

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**DOSAGEM SUPERPAVE DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM
GRÂNULOS DE BORRACHA PRÉ-ATIVADOS**

ARTHUR NUNES ESTEVES

ORIVALDO GOMES DA SILVA

ORIENTADOR: Márcio Muniz de Farias, PhD

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
CIVIL**

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO / 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

DOSAGEM SUPERPAVE DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM
GRÂNULOS DE BORRACHA PRÉ-ATIVADOS

ARTHUR NUNES ESTEVES
ORIVALDO GOMES DA SILVA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

Márcio Muniz de Farias, PhD (UnB)

(ORIENTADOR)

Juan Gabriel Bastidas Martinez, Doutorando (UnB)

(EXAMINADOR INTERNO)

Letícia Cardoso Nunes, Mestranda (UnB)

(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 13 de dezembro de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

ESTEVES, ARTHUR NUNES & SILVA, ORIVALDO GOMES

Dosagem superpave de Misturas Asfáltica com Grânulos de Borracha Pré-Ativados [Distrito Federal].

ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Dosagem

2. Misturas Asfálticas

3. Grânulos de Borracha

I. ENC/FT/UnB

II. Bacharel, Engenharia Civil

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ESTEVES, A.N. (1988) & SILVA, O.G. (1976). Dosagem superpave de Misturas Asfálticas com Grânulos de Borracha Pré-Ativados. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Arthur Nunes Esteves & Orivaldo Gomes da Silva

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Dosagem superpave de Misturas Asfálticas com Grânulos de Borracha Pré-Ativados. GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos.

Arthur Nunes Esteves

Orivaldo Gomes da Silva

Dedicamos a Deus pelo dom da vida, e a nossa família pelo incondicional apoio durante todo esse tempo. Enfim, muitíssimo obrigado a todos!

AGRADECIMENTO

Agradecemos primeiramente a Deus pelo dom da vida, a nossa família, aos nossos amigos que sempre fizeram presentes nos ajudando nessa caminhada.

Nossos agradecimentos aos colegas de sala que nos proporcionaram até aqui uma caminhada mais amena e prazerosa. Aos professores que sempre fizeram o máximo para garantir o melhor aprendizado tanto para nós quanto para os nossos colegas.

Agradecemos a nossa instituição e a todos que fazem a Universidade de Brasília – UnB, ser essa referência no ensino de qualidade, a todos o nosso muitíssimo obrigado.

Por fim, e não menos importante agradecemos incondicionalmente o nosso Orientador Márcio Muniz de Farias, pela sua dedicação, compreensão e por ter confiado na nossa capacidade para chegar até aqui.

Obrigado a todos. Sem vocês não seria possível à realização desse sonho.

Resumo

Levantamentos recorrentes têm considerado a grande maioria dos pavimentos do Brasil de baixa qualidade ao tráfego, incluindo muitos trechos concessionados da malha federal. Estas patologias estão associadas a diversos fatores, como falta de manutenção, excesso de cargas, materiais não adequados ao projeto e às normas, deficiência no controle de qualidade na construção, ausência de dispositivos de drenagem e geometria inadequada.

Diante da grande demanda do transporte por meio da modalidade rodoviária e as patologias recorrentes no revestimento asfáltico, devido às grandes solicitações de tráfego e carregamento nas rodovias brasileiras é necessário pesquisar formas de melhorar a vida útil e a resistência desses materiais utilizados na pavimentação. A utilização da borracha como modificadora do ligante asfáltico tem como finalidade a melhoria de propriedades físicas do ligante e dos parâmetros de desempenho das misturas asfálticas.

Pesquisas recentes mostram que a utilização de grânulos de borracha pré-ativados (RAR) melhora o desempenho de misturas asfálticas de granulometrias abertas usinadas a quente.

Este estudo tem por objetivo inicial a dosagem de misturas asfálticas descontínuas (*gap graded*) com incorporação de grânulos de borracha pré-ativados baseado nas metodologias Marshall e Superpave. Para se atingir tal objetivo serão realizados ensaios de caracterização do agregado e projeto de dosagem com diferentes teores de RAR e amostras de mistura asfáltica com Pellets. Assim deseja-se obter os teores de projeto para a variação de teor de RAR.

1. SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. Identificação do problema	15
1.2. Justificativa.....	15
1.3. Objetivo.....	15
1.4. Metodologia	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. Asfalto Borracha	16
2.2. Modificadores de Ligante.....	17
2.2.1 Pellets	18
2.3. Processos de produção de asfalto-borracha.....	19
2.3.1. Processo Seco	19
2.3.2. Processo Úmido	20
2.3.3. Processo em Terminal.....	22
2.4. Reacted and Activated Rubber	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1. Ensaio de caracterização dos materiais.....	25
3.2. Limpeza.....	26
3.3. Resistência à abrasão.....	28
3.4. Ensaio de avaliação da durabilidade do agregado pelo de soluções de sulfato – Sanidade-	29
3.5. Determinação da absorção e da Densidade de agregado graúdo	31
3.6. Partículas alongadas e achatadas	34
3.7. Ensaio de ponto de amolecimento.....	34
3.8. Ensaio de massa específica e densidade relativa.....	37
3.9. Ensaio de penetração	37
4. Dosagem Superpave	38

5. Conclusão 60

Lista de Figuras

Figura 1: Principais defeitos em revestimento (Pinheiro, 2004).	13
Figura 2: Asfalto-Borracha agindo contra a reflexão de trincas (Pinheiro, 2004).	17
Figura 3: Componentes de deformação (Sides <i>et al.</i> , 1985).	18
Figura 4: Processo seco para a modificação das misturas asfálticas com borracha (Dantas Neto, 2004).	20
Figura 5: Processo úmido para fabricação dos asfaltos-borracha (Dantas Neto, 2004).	21
Figura 6: Modelo sugerido para descrever a estrutura e comportamento da RAR (Sousa <i>et al.</i> , 2012).	24
Figura 7: Quadro representativo dos ensaios	24
Figura 8: Ensaio equivalente de areia	25
Figura 9: Ensaio Abrasão Los Angeles	27
Figura 10: Ensaio Sanidade	28
Figura 11: Balança hidrostática	30
Figura 12: densidade real – agregado miúdo	31
Figura 13: Partículas alongadas e achatadas	32
Figura 14: Ensaio ponto de amolecimento	33
Figura 15: Ensaio de Viscosidade	34
Figura 16: Gráfico Viscosidade x T°C	34
Figura 17: Ensaio de Massa Específica	36
Figura 18: Ensaio de Penetração	37
Figura 19: Compactador Giratório	39
Figura 20: Curva Granulométrica Gap-Graded referência ADOT	40
Figura 21: Corpo de prova compactado	44
Figura 22: Ensaio RICE	45
Figura 23:	45

Figura 24:	46
Figura 25: Gráfico % Gmm x N° de giros Pellets 30%	50
Figura 26: Gráfico % Gmm x N° de giros RAR 25%	54
Figura 27: Gráfico % Gmm x N° de giros RAR 30 %	58

Lista de Tabelas

Tabela 1: Benefícios de diferentes tipos de modificadores de asfalto	18
Tabela 2: Ensaio Sanidade	30
Tabela 3: Ensaio ponto de amolecimento	34
Tabela 4: Ensaio de Viscosidade	35
Tabela5: Ensaio de Penetração	36
Tabela 6: Número de giros especificados na norma de dosagem Superpave. Fonte:AASHTO(2001)	39
Tabela 7: Granulometria da <i>Gap-Graded</i> (Fonte Instrução Técnica n° 67 (DER-RJ)).	41
Tabela 8: Granulometria Gap-Graded	43
Tabela 9: Critérios volumétricos para teor de projeto	46
Tabela 10: Resultados compactação CP 3A (8,8%) - Pellets	47
Tabela 11: Resultados compactação CP 3B (8,8%) - Pellets	48
Tabela 12: Gmm – 30% Pellets	52
Tabela 13: Gmb – 30% Pellets	52
Tabela 14: Resultados compactação CP 2A (8,3%) - RAR 25%	54
Tabela 15: Gmm – RAR 25%	55
Tabela 16: Gmb – RAR 25%	56
Tabela 17: Resultados compactação CP 3A (8,8%) - RAR 30%	57
Tabela 18: Resultados compactação CP 3B (8,8%) - RAR 30%	58
Tabela 19: Gmm – RAR 30%	59
Tabela 20: Gmb – RAR 30%	60

1. INTRODUÇÃO

Segundo o relatório gerencial CNT (2015) o transporte rodoviário é o principal meio de transporte de pessoas e produtos no Brasil, sendo responsável pela circulação de 61% dos produtos nacionais na modalidade de transporte de cargas, seguido pelos modais ferroviário (20,7%), aquaviário (13,6%), dutoviário (4,2%) e aéreo (0,4%). No transporte de passageiros, as rodovias predominam com participação de 95% tendo fundamental importância no crescimento econômico do País. Levantamentos recorrentes da Confederação Nacional do Transporte – CNT têm considerado a grande maioria dos pavimentos do Brasil de baixo conforto ao rolamento, incluindo muitos trechos concessionados da malha federal. Nas últimas décadas, o investimento em infraestrutura rodoviária se encontra bem aquém das necessidades do país, havendo uma crescente insatisfação do setor produtivo com esse nível de investimento. Observa-se que os bens produzidos no país podem ser mais competitivos na fase de produção, mas perdem competitividade, notadamente, no quesito infraestrutura de transportes, devido a uma matriz modal deficiente. Diante das deficiências em relação ao transporte de carga, o Brasil perdeu oito posições no ranking de competitividade do Fórum Econômico Mundial. Segundo o Relatório de Competitividade Global (2014), divulgado pela organização, o país caiu do 48º para o 56º lugar no índice global (Fundação Dom Cabral).

Entre os anos de 2005 e 2015 as rodovias pavimentadas da região Centro-Oeste do Brasil apresentaram crescimento de 19,3%, enquanto no mesmo período o crescimento da frota veicular na região foi de 140,2%. Em relação ao aspecto geral, 15,1% das rodovias federais e 37% das rodovias estaduais estão classificadas em condições ruins ou péssimas (CNT, 2015).

O objetivo principal da pavimentação é garantir a trafegabilidade em qualquer época do ano e condições climáticas, e proporcionar aos usuários conforto ao rolamento e segurança. Uma vez que o solo natural não é suficientemente resistente para suportar a repetição de cargas de roda sem sofrer deformações significativas, torna-se necessária a construção de uma estrutura, denominada pavimento, que é construída sobre o subleito para suportar as cargas dos veículos de forma a distribuir as solicitações às suas diversas camadas e ao subleito, limitando as tensões e as deformações de forma a garantir um desempenho adequado da via, por um longo período de tempo (Croney, 1977).

Do ponto de vista do usuário, o estado da superfície do pavimento é o mais importante, pois os defeitos ou irregularidades nessa superfície são percebidos uma vez que afetam seu conforto. Quando o conforto é prejudicado, significa que o veículo também sofre mais intensamente as consequências desses defeitos. Essas consequências acarretam maiores custos operacionais, relacionados a maiores gastos com peças de manutenção dos veículos, com consumo de combustível e de pneus, com o tempo de viagem etc. Portanto, atender o conforto ao rolamento também significa economia nos custos de transporte (SINESP, 2014).

Em um pavimento o revestimento é a camada que se destina a receber a carga. Para isto, esta camada deve ser impermeável e resistente de acordo com a solicitação. Na maioria dos pavimentos brasileiros usa-se como revestimento uma mistura de agregados minerais, de vários tamanhos, podendo também variar quanto à fonte, com ligantes asfálticos que, de forma adequadamente proporcionada e processada, garanta ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previsto para o local (Senço *et al.*, 2007).

A péssima situação da malha viária brasileira pode ser atribuída a diversos fatores além do revestimento em si, como a falta de manutenção, sobrecarga de caminhões, fundações não apropriadas, falta de drenagem adequada, materiais sem a qualidade desejada, geometria inadequada, má sinalização, má execução, etc. Vale também lembrar que todo pavimento é projetado para uma determinada vida útil e é natural que durante e após esta vida útil sejam feitas intervenções, buscando-se aumentar a durabilidade do revestimento e do pavimento (Pinheiro, 2004). No que concerne o revestimento, os principais defeitos encontrados são a deformação permanente formada nas trilhas de roda e o trincamento por fadiga pela repetição do carregamento, como mostra a Figura 1.



(a) Deformação Permanente (b) Trincamento por fadiga

Figura 1: Principais defeitos em revestimento (Pinheiro, 2004).

Ao longo dos anos, muitas tecnologias ou metodologias de projeto evoluíram para melhorar o desempenho do pavimento, de forma a obter vida útil prolongada a um menor custo. Para pavimentos flexíveis, algumas destas melhorias foram feitas com a modificação do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), adicionando polímeros (EVA, SBS e etc) e borracha granulada de pneus usados (Neto, 2004).

Além de possibilitar a melhoria do desempenho de pavimentos, a utilização da borracha granulada de pneus usados apresenta-se como alternativa de reciclagem, uma vez que no Brasil, segundo dados da ANIP (Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos) foram produzidos no ano de 2015 cerca de 68 milhões de novos pneus, dos quais 63,5% deste total destinaram-se à venda para reposição (ANIP, 2015). Com a resolução 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA, a reciclagem de pneus inservíveis passou a ser obrigatória. A presente monografia trata de um estudo de dosagem de misturas asfálticas com incorporação de borracha de pneu, com o intuito de contribuir em pesquisas de revestimentos asfálticos, assim como minimizar o problema ambiental.

A principal razão para a utilização de ligante modificado com borracha em misturas betuminosas deve-se ao fato de este tipo de ligante proporcionar uma melhoria significativa do comportamento estrutural e funcional das misturas betuminosas comparativamente ao que é obtido com ligantes convencionais como pode ser comprovado em diversas referências (Dantas Neto, 2004; Pinheiro, 2004; Bernucci, 2007). Os ligantes modificados com borracha podem ser formulados para serem aplicados em quaisquer condições climáticas. Os fabricantes de ligantes modificados com borracha habitualmente têm em consideração as condições climáticas e o tráfego na

sua formulação para obter um produto modificado com borracha adequado. A utilização de asfalto-borracha leva a consideráveis melhorias no pavimento, entre elas: redução do custo de manutenção das vias, aumento da resistência à derrapagem, diminuição da reflexão de trincas em reforços estruturais, além de redução nos níveis de poluição sonora quando se empregam misturas de graduação descontínua ou aberta (Way, 2000).

Contudo, apesar das vantagens comprovadas das misturas betuminosas com ligantes modificados com borracha, ainda há um óbice no avanço ou desenvolvimento significativo na utilização e implementação desta tecnologia de uma forma prática. Esta objeção se dá pelo fato de a fabricação convencional de ligante modificado com borracha através do processo de modificação por via úmida envolver a utilização de temperaturas muito elevadas (superiores a 190 °C) e de um elevado tempo de reação (45 minutos até 1 hora), além da complexidade e o elevado custo da unidade de fabricação do ligante modificado que necessariamente deve ser instalada em todas as centrais de fabricação de misturas betuminosas. Outro fator é a necessidade de reaquecer o ligante após longos períodos de armazenamento somado ao elevado custo das misturas betuminosas com ligantes modificados comparativamente às misturas betuminosas convencionais (superior em 20% a 100%) (Sousa, 2013; Vorobiev, 2013).

Tendo em vista a vantagem comprovada dos ligantes modificados com borracha, foi feito um esforço para superar as principais desvantagens acima enumeradas. Uma solução foi desenvolvida para proporcionar uma base para uma nova solução de ligantes betuminosos modificados com borracha, essa solução é a Reacted and Activated Rubber – RAR. A proposta deste novo tipo de asfalto-borracha é a simplificação do processo de usinagem (como o realizado na mistura asfáltica obtida pelo processo seco) e obtenção de desempenho da mistura asfáltica superior (como a mistura asfáltica obtida pelo processo úmido), além da utilização de uma maior percentagem de borracha e um processo de mistura a temperaturas mais baixas (Sousa, 2013; Vorobiev, 2013).

Pretende-se neste trabalho determinar o teor de ligante de projeto em misturas asfálticas com diferentes teores de RAR com a metodologia de dosagem Superpave.

A dosagem de uma mistura asfáltica tem consistido até hoje na escolha, através de procedimentos experimentais, de um teor dito “ótimo” de ligante, a partir de uma faixa granulométrica predefinida. O teor de projeto de ligante asfáltico varia de acordo com o método de dosagem, e é função de parâmetros como energia de compactação, tipo de

mistura, temperatura a qual o pavimento estará submetido, entre outros. (Pinheiro, 2004).

1.1. Identificação do problema

O problema científico a ser investigado consiste na determinação do teor de ligante de projeto em misturas asfáltica com adição de grânulos de borracha pré-ativados (RAR) em diferentes teores.

1.2. Justificativa

Diante da grande demanda do transporte por meio da modalidade rodoviária e as patologias recorrentes nos revestimentos asfálticos devido às grandes solicitações de tráfego e carregamento nas rodovias brasileiras é necessário pesquisar com o objetivo de aumentar a vida útil e a resistência desses materiais utilizados na pavimentação. A utilização da borracha como modificadora do ligante asfáltico tem como finalidade a melhoria de propriedades físicas do ligante e dos parâmetros de desempenho das misturas asfálticas.

A RAR pode ser adicionada a qualquer tipo de mistura betuminosa: densa, rugosa, aberta, do tipo SMA, etc, porém, neste estudo será utilizada a granulometria descontínua a qual não possui uma curva granulométrica bem graduada, contendo um patamar que indica a falta de uma fração de agregados miúdos. Esta característica é usada para promover o contato grão-a-grão em misturas asfálticas. Este tipo de granulometria é mais utilizado em misturas com asfalto borracha.

Apesar de a RAR poder ser utilizada em misturas densas optou-se por utilizar a granulometria *gap-graded*, pois conforme a prática na Califórnia o asfalto borracha não é recomendado em misturas densas devido ao espaço insuficiente para acomodar o ligante ao ponto de melhorar significativamente o desempenho do pavimento (Caltrans, 2003).

1.3. Objetivo

Este estudo tem por objetivo inicial a dosagem de misturas asfálticas descontínuas (*gap graded*) com incorporação de grânulos de borracha pré-ativados baseado na metodologia Superpave. Para se atingir tal objetivo serão realizados ensaios de caracterização do agregado e projeto de dosagem com diferentes teores de RAR e

amostras de mistura asfáltica com Pellets. Assim deseja-se obter os teores de projeto para a variação de teor de RAR.

1.4. Metodologia

O trabalho parte do princípio de que a adição de grânulos de borracha pré-ativados melhora o desempenho de misturas asfálticas abertas usinadas a quente. Trata-se, portanto, de uma abordagem hipotética dedutiva.

Inicialmente será realizado um levantamento bibliográfico abordando os principais aspectos relacionados aos pavimentos executados com asfalto-borracha. Dentre os assuntos inerentes desta dissertação encontra-se: CAP modificado, incorporação de borracha de pneus reciclados e grânulos de borracha pré-ativados.

Após esta etapa será idealizado o planejamento experimental de forma a selecionar os ensaios representativos a serem realizados para caracterização e seleção dos agregados para mistura de granulometria descontínua e do ligante asfáltico, assim como estudo de dosagem para a preparação dos corpos de prova destinados ao ensaio de fadiga.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Asfalto Borracha

Uma forma de se incorporar os benefícios de um polímero ao ligante asfáltico, e ao mesmo tempo reduzir problemas ambientais, é utilizar a borracha de pneus inservíveis em misturas asfálticas. Os pneus inservíveis são problemas para a sociedade e sua utilização em pavimentação tem sido uma das técnicas mais utilizadas em todo o mundo porque se emprega grande volume desse resíduo com melhorias para as misturas asfálticas em vários aspectos. No intuito de melhorar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas, bem como reduzir o passivo ambiental causado pela crescente deposição inadequada de pneumáticos na natureza, muitos países vêm desenvolvendo tecnologia para a incorporação de borracha moída de pneu em revestimentos asfáltico. Os diversos estudos sobre esta adição vêm apontando inúmeros benefícios à mistura, dentre os quais podem ser citados a redução do envelhecimento, o aumento da flexibilidade, a redução de deformações permanentes, a melhoria da susceptibilidade térmica, a redução do ruído, o aumento da vida de fadiga, etc (Pinheiro, 2004; Bernucci *et al.*, 2007).



Figura 2: Asfalto-Borracha agindo contra a reflexão de trincas (Pinheiro, 2004).

2.2. Modificadores de Ligante

Os asfaltos convencionais atendiam satisfatoriamente à maioria das vias brasileiras. No entanto, a crescente demanda ao pavimento, provocada pelo aumento do número de veículos e pelo aumento da carga por eixo em veículos pesados, demanda uma qualidade superior das misturas e de seus constituintes, agregados e ligantes. Os modificadores de ligante entram como um dos agentes mais importantes nessa melhora de qualidade das misturas. Os principais defeitos dos pavimentos brasileiros são trincamento por fadiga e deformação permanente e o comportamento viscoelástico do ligante é, em grande parte, o controlador do desempenho de uma via, influenciando diretamente o surgimento desses defeitos (Pinheiro, 2004).

Em misturas asfálticas, a relação tensão-deformação depende do tempo e da temperatura. Ao se aplicar uma carga, ocorre uma deformação instantânea, seguida de uma deformação crescente devido ao comportamento viscoso do material. Após a retirada do carregamento, há uma recuperação instantânea (parcela elástica) e outra recuperação adicional ao longo do tempo em função da deformação em materiais viscosos depender do tempo. Após este processo a parcela de deformação que não recuperar é chamado de deformação permanente, indicando um comportamento visco-elástico-plástico das misturas asfálticas (Pinheiro, 2004).

A Figura 3 (Sides *et al.*, 1985) a seguir representa o ensaio de creep que demonstra a o comportamento de materiais visco-elástico-plástico.

Há uma diversidade de modificadores de ligantes e cada um apresenta certos benefícios em sua incorporação. Sendo assim, apresenta-se na Tabela 1 o resultado dos principais benefícios oriundo de diversos tipos de modificadores.

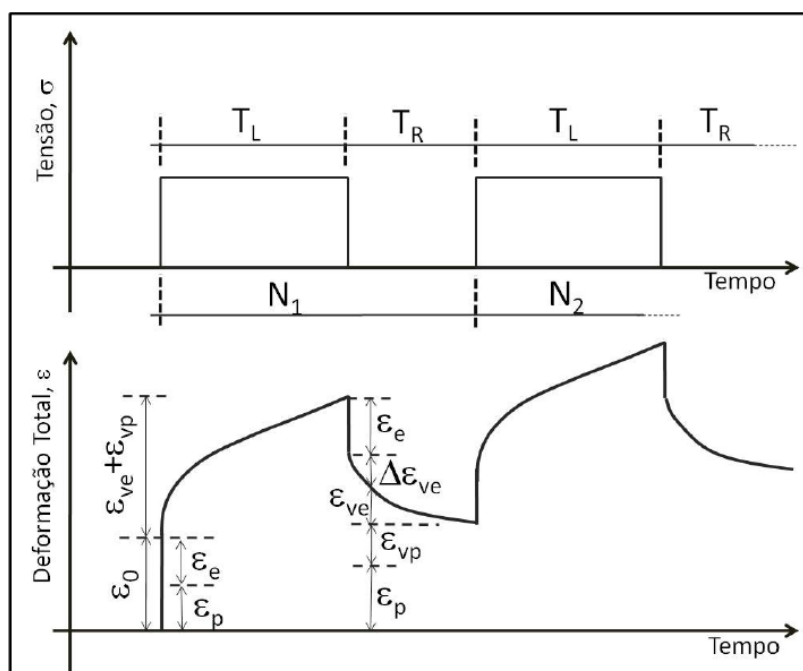


Figura 3: Componentes de deformação (Sides *et al.*, 1985).

Tabela 1: Benefícios de diferentes tipos de modificadores de asfalto (modificado de Shell, 2003).

Modificador	Deformação Permanente	Trincas Térmicas	Trincas de Fadiga	Dano por Umidade	Envelhecimento
Elastômeros					
Plastômeros					
Borracha de pneu					
Negro-de-fumo					
Cal					
Enxofre					
Modificadores químicos					
Antioxidante					
Melhorador de adesividade					
Cal hidratada					

2.2.1 Pellets

Um dos modificadores que será utilizado para dosagem será as fibra orgânica em forma de Pellets. As fibras são geralmente orgânicas (de celulose) ou minerais, e são adicionadas durante a usinagem para evitar a segregação da mistura em seu transporte,

facilitar a aplicação e evitar o escorrimento do ligante asfáltico. As fibras orgânicas podem ser utilizadas também em pellets ou agregações (Napa, 1999).

De acordo com a companhia PelletPave no processo de produção do Pellet, os pneus inservíveis são triturados e transformados em pó de borracha. Em seguida a borracha é usinada com o CAP e são adicionados outros minerais no processo chamado “peletização” para produzir asfalto modificado. Por fim, os pellets são usinados junto com o agregado para produzir a massa asfáltica. As principais vantagens dessa metodologia são a logística do manuseio do asfalto e aumento do desempenho do asfalto modificado (www.PelletPAVE.com).

2.3. Processos de produção de asfalto-borracha

Takallou e Takallou (2003) citam três processos de incorporação de borracha granulada ao ligante asfáltico: o processo seco, o processo úmido e o processo terminal.

2.3.1. Processo Seco

Segundo Bernucci (2007) no processo seco, a borracha triturada entra como parte do agregado pétreo da mistura sendo adicionados diretamente no misturador da usina de asfalto e juntamente com o ligante asfáltico dá origem ao produto concreto asfáltico modificado com adição de borracha (RUMAC – *rubber modified asphalt concrete*). Specht (2004) destaca que a borracha adicionada deve substituir no máximo 5% do agregado. A granulometria normalmente é a mesma que a utilizada em misturas convencionais, entretanto temperaturas maiores são necessárias para a mistura (160°C-180°C) e para compactação (148°C-160°C). A mistura modificada com adição de borracha via seca só deve ser utilizada em misturas asfálticas a quente (concreto asfáltico convencional ou com granulometria especial descontínua – *gap-graded*, por exemplo), não devendo ser usada em misturas a frio (Specht, 2004; Patriota, 2004; Pinheiro, 2004). A Figura 4 mostra o esquema de produção de asfalto-borracha pelo processo seco.

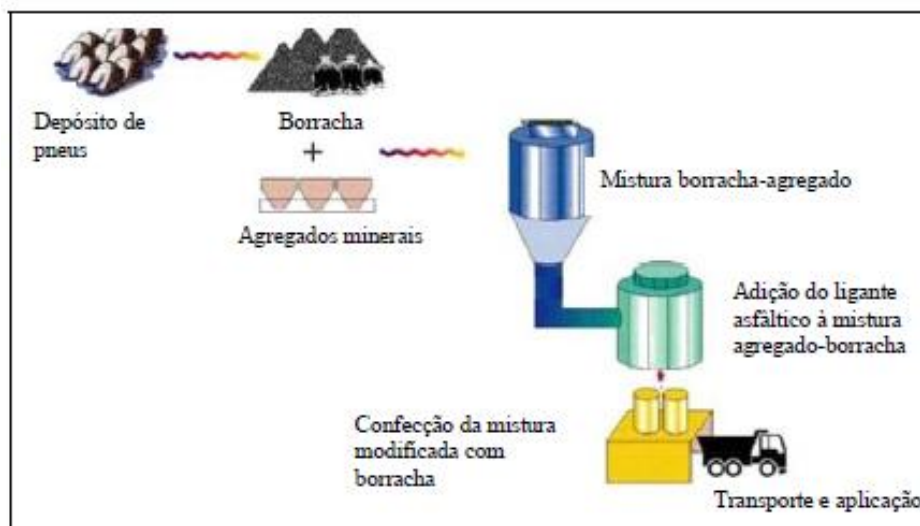


Figura 4: Processo seco para a modificação das misturas asfálticas com borracha (Dantas Neto, 2004).

2.3.2. Processo Úmido

A ASTM D6114/09 define o processo úmido que dá origem ao ligante asfalto-borracha como uma combinação de cimento asfáltico, grânulos de borracha de pneu reciclado e outros aditivos, caso necessário. A borracha triturada é misturada e interage com o ligante asfáltico aquecido, de forma a causar um inchamento das partículas de borracha. A norma específica indica que são necessários pelo menos 15% de borracha, em relação ao peso total da mistura, para proporcionar propriedades aceitáveis de asfalto-borracha.

Visser & Verhaeghe (2000) apontam que no processo úmido o ligante asfáltico é aquecido a temperaturas da ordem de 190°C, em um tanque de superaquecimento em condições herméticas, sendo transportado em seguida, para um tanque de mistura apropriado. No tanque de mistura, ocorre a adição da borracha granulada ao ligante convencional previamente aquecido. A mistura entre o ligante convencional e a borracha granulada, ocorre em um período de 1 a 4 horas a uma determinada temperatura. Este processo é facilitado pela ação de um dispositivo mecânico, geralmente uma palheta giratória horizontal introduzida no tanque de mistura. A Figura 5 esquematiza o processo úmido para a fabricação dos asfaltos-borracha.

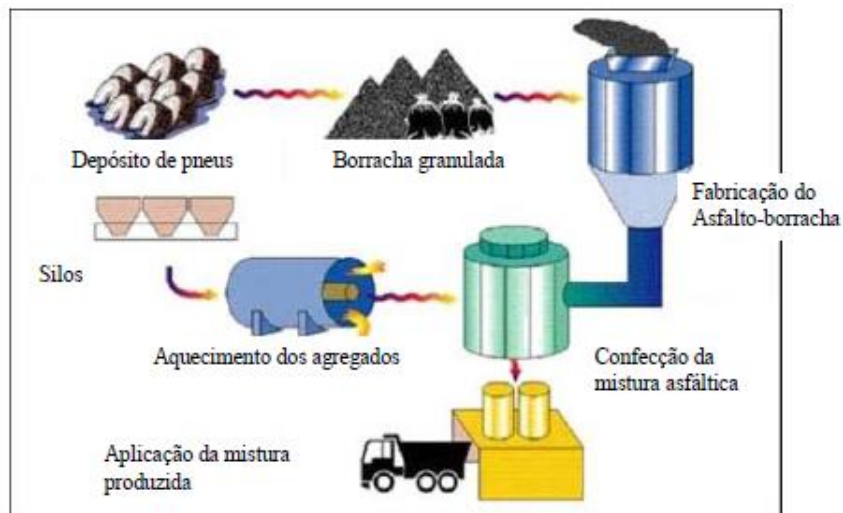


Figura 5: Processo úmido para fabricação dos asfaltos-borracha (Dantas Neto, 2004).

Leite *at al.* (2000) citando Abdelrahman (1996) e outros autores explicam que o desempenho do CAP como ligante em revestimentos flexíveis é determinado pelas suas propriedades físicas, que dependem diretamente da composição química. Neste processo ao absorver os óleos aromáticos contidos no cimento asfáltico a borracha aumenta de volume, formando um gel viscoso, resultado da redução da distância entre partículas de borracha, aumentando viscosidade. Segundo Specht (2004), em contrapartida, são transferidas para o asfalto algumas características químicas das borrachas vulcanizadas como inibidores de raios ultravioleta e antioxidantes, produzindo assim, um material mais resistente ao envelhecimento e com maior resistência a fissuração, contribuindo para uma maior durabilidade do pavimento.

Faxina (2006) observa que é desejável que o ligante asfáltico empregado no processo úmido contenha uma concentração relativamente alta de frações leves, o que pode ser obtido pela adição de óleos extensores ou pela seleção de ligantes asfálticos de menor consistência. Em ambos os casos, é possível compensar o aumento da viscosidade provocado pela adição da borracha, assim como proporcionar óleos aromáticos em quantidade suficiente para promover a reação entre a borracha e o ligante asfáltico, sem remover componentes essenciais do ligante asfáltico de base.

A habilidade da borracha em melhorar as propriedades do CAP depende da compatibilidade entre os dois. O tipo e a quantidade de óleos aromáticos presentes no ligante desempenham um papel significativo na determinação desta compatibilidade (Pinheiro, 2004).

Para melhorar a compatibilização entre o ligante e a borracha pode ser utilizado um óleo extensor, que ainda serve para diminuir a viscosidade do ligante Asfalto-Borracha. Cuidado especial deve ser tomado com a temperatura de reação, pois temperaturas elevadas podem provocar o envelhecimento precoce do CAP, mudando suas características. Lucena *et al.* (2002) sugerem que esta mudança, causada por processo termo-oxidativo, pode ter origem na perda de voláteis ou frações de baixo peso molecular e na formação de ligações de hidrogênio.

Para a utilização do Asfalto-Borracha durante as últimas décadas, foram testados vários tipos de misturas betuminosas, procurando adequações entre a faixa granulométrica destas e a viscosidade do ligante. Misturas densas contínuas de Asfalto- Borracha, empregadas há mais de 20 anos nos Estados Unidos, são efetuadas nos estados da Califórnia e Flórida, enquanto que o estado do Arizona só emprega misturas abertas e descontínuas. Na Flórida as misturas contínuas são constituídas de ligantes com 6 a 12% de borracha e viscosidade inferior a 1.500cP a 175°C com granulometria da borracha entre as peneiras #40 (0,42mm) e #200 (0,075mm), enquanto que as misturas descontínuas usam teores mais altos de borracha no ligante. Na Califórnia, as misturas densas, contínuas e descontínuas, empregam ligante com maior teor de borracha, da ordem de 17 a 23%, com presença de óleo extensor pouco viscoso e isento de asfaltenos, de modo que a viscosidade do ligante modificado se situe na faixa de 1.500 a 3.000cP a 175°C, e com granulometria de borracha entre as peneiras #8 (2,36mm) e #200 (0,075mm) (FHWA, 1995).

2.3.3. Processo em Terminal

O processo designado como *Terminal Blend* é uma modificação do processo úmido que facilita a produção de ligante modificado na própria refinaria. No sistema *Terminal Blend*, a modificação física, reológica e química do asfalto convencional é realizada por meio de um adequado processo de fusão por meio de agitação mecânica e digestão térmica em moinhos de cisalhamento devidamente controlada que resulta em um produto uniforme e estável porque possui estabilidade que não permite que ocorra a separação de fases durante o armazenamento (Morilha & Greca, 2003). Assim pode ser produzido em uma planta e posteriormente transportado para a obra.

Embora o processo terminal não necessite equipamentos específicos acoplados diretamente durante a fase de usinagem, segundo Takallou & Takallou (2003) o

processo de incorporação por via terminal caracteriza-se por utilizar uma quantidade de borracha geralmente inferior àquela empregada no processo úmido. Além disso, a quantidade reduzida de borracha de pneu e a introdução de óleos extensores na mistura fazem com que o desempenho desta seja reduzido quando comparado ao de misturas obtidas pelo processo úmido.

2.4. Reacted and Activated Rubber

A borracha com grânulos pré-ativados – RAR (*Reacted and Activated Rubber*) é um ligante betuminoso modificado com borracha, composta por ligante convencional, granulado fino de borracha e por um estabilizador de betume do tipo fíler mineral ativo (*Activated Mineral Binder Stabilizer* - AMBS) em percentagens devidamente otimizadas. A RAR é produzida através da mistura à quente dos seus constituintes durante um curto período de tempo, sendo posteriormente realizada a ativação através de um processo especialmente concebido para formar um granulado de borracha seco ativado (Sousa, 2013).

A RAR pode ser adicionada a qualquer tipo de mistura betuminosa: densa, rugosa, aberta, do tipo SMA, etc., permitindo substituir parte do betume a utilizar, segundo diferentes proporções. A adição de RAR em usinas é efetuada diretamente no misturador ou no tambor secador, imediatamente após a pulverização do betume, utilizando unidades de alimentação existentes (p.ex. alimentador de fibras para fabricação de misturas betuminosas do tipo SMA, etc.) (Sousa, 2013).

Avanços com a utilização desta nova tecnologia de asfalto-borracha remontam a pesquisas realizadas com *Activated Mineral Binder Stabilizer* - AMBS, ou estabilizador de ligante mineral ativo. O AMBS foi desenvolvido para evitar o escorrimento excessivo do ligante em misturas do tipo SMA, durante o transporte, armazenamento e aplicação. Os resultados das pesquisas mostraram que a substituição das fibras de celulose por AMBS em misturas do tipo SMA ocasionaram muitos efeitos positivos em indicadores de desempenho, como resistência ao dano por água, resistência à deformação em altas temperaturas, resistência ao trincamento em baixas temperaturas e aumento na vida de fadiga (Wu *et al.* 2012).

Segundo Sousa *et al.* (2012) a RAR é igualmente envolvida com uma fórmula especial de AMBS que uma vez dispersa no asfalto também se interliga ela própria aos agregados. Esta interligação melhora a adesividade entre o asfalto e o agregado,

reduzindo a sensibilidade à água. Desta forma a nova rede interliga os agregados, o asfalto, o material elastômero e as partículas de AMBS, como ilustra a Figura 6. Tal estrutura não pode ser formada quando apenas se mistura asfalto com borracha (sem AMBS) como sucede na atual tecnologia de produção de asfalto-borracha pelo processo úmido ou terminal.

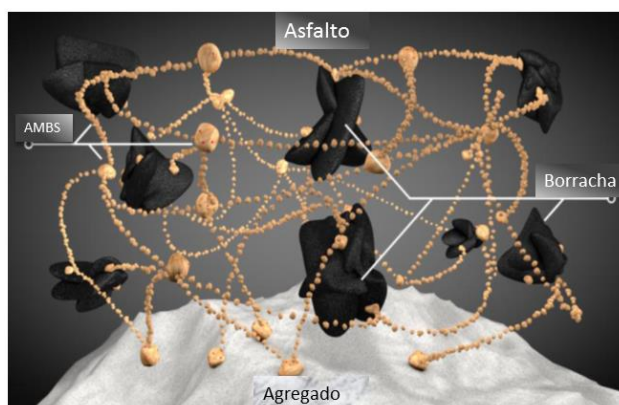


Figura 6: Modelo sugerido para descrever a estrutura e comportamento da RAR (Sousa *et al.*, 2012).

Segundo o estudo efetuado por Sousa (2013) é demonstrado que as misturas betuminosas fabricadas com RAR apresentam um desempenho superior comparativamente às misturas betuminosas convencionais, assim como relativamente a misturas betuminosas com ligantes modificados com polímeros. Em geral, foi constatado que a RAR atua como um extensor elastômero do betume que modifica o betume puro aumentando o seu grau de desempenho (*PG – Performance Grade*), a resiliência, a temperatura de amolecimento e as suas propriedades após recuperado. Foi ainda possível constatar que para diferentes tipos de misturas betuminosas fabricadas com RAR, estas apresentam um desempenho superior no que concerne à estabilidade, resistência à deformação permanente e à fadiga, assegurando uma boa relação custo/benefício (Sousa, 2013).

A seguir são apresentadas as principais vantagens da RAR como ligante betuminoso modificado com borracha a utilizar na fabricação de misturas betuminosas comparativamente à tecnologia convencionalmente utilizada para modificação do ligante com borracha:

- Fabricação mais fácil e rápida. Não é necessária uma unidade de mistura como no caso da fabricação do ligante modificado com borracha.

- Não é necessária a realização de ciclos de reaquecimento na usina de fabricação de misturas ou no local de aplicação;
- A RAR é um material granulado seco – fácil de manusear, armazenar e transportar;
- Pode ser adicionado em qualquer usina de fabricação de misturas betuminosas diretamente no misturador ou no tambor secador;
- Quando misturada a RAR com um ligante convencional na usina de fabricação de misturas betuminosas, é obtido um ligante betuminoso modificado com borracha com propriedades de resiliência e recuperação melhor, assim como uma maior viscosidade e temperatura de amolecimento;
- Com a correta percentagem de RAR, qualquer tipo de mistura betuminosa com RAR pode ser fabricado (densa, rugosa, SMA, aberta, etc.);
- Podem ser fabricadas misturas betuminosas temperadas com a utilização de um aditivo adequado;
- Benefícios ambientais através da utilização de proporções elevadas de borracha (a partir da reciclagem de pneus usados) e menores temperaturas durante a produção do ligante betuminoso modificado com borracha;
- Boa relação custo/benefício comparativamente às misturas betuminosas convencionais ou com ligante betuminoso convencional;

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Ensaios de caracterização dos materiais.

Segundo pesquisadores do SHRP (apud Bernucci, 2007), há um consenso de que as propriedades dos agregados têm influência direta no comportamento dos revestimentos asfálticos quanto a deformações permanentes, e afetam, embora em menor grau, o comportamento relacionado ao trincamento por fadiga e por baixas temperaturas.

A caracterização dos agregados foi feita através dos seguintes ensaios: Tamanhos e Distribuição, Limpeza, Resistência à Abrasão, Formas das Partículas, Sanidade e Densidade Específica. Em relação aos ligantes asfálticos, foram realizados os seguintes ensaios: Penetração, Viscosidade, Ponto de Amolecimento, Massa Específica e

Densidade Relativa. Na Figura 7 apresenta-se o quadro de ensaios que foram realizados visando avaliar se tais materiais atenderam as especificações das normas.

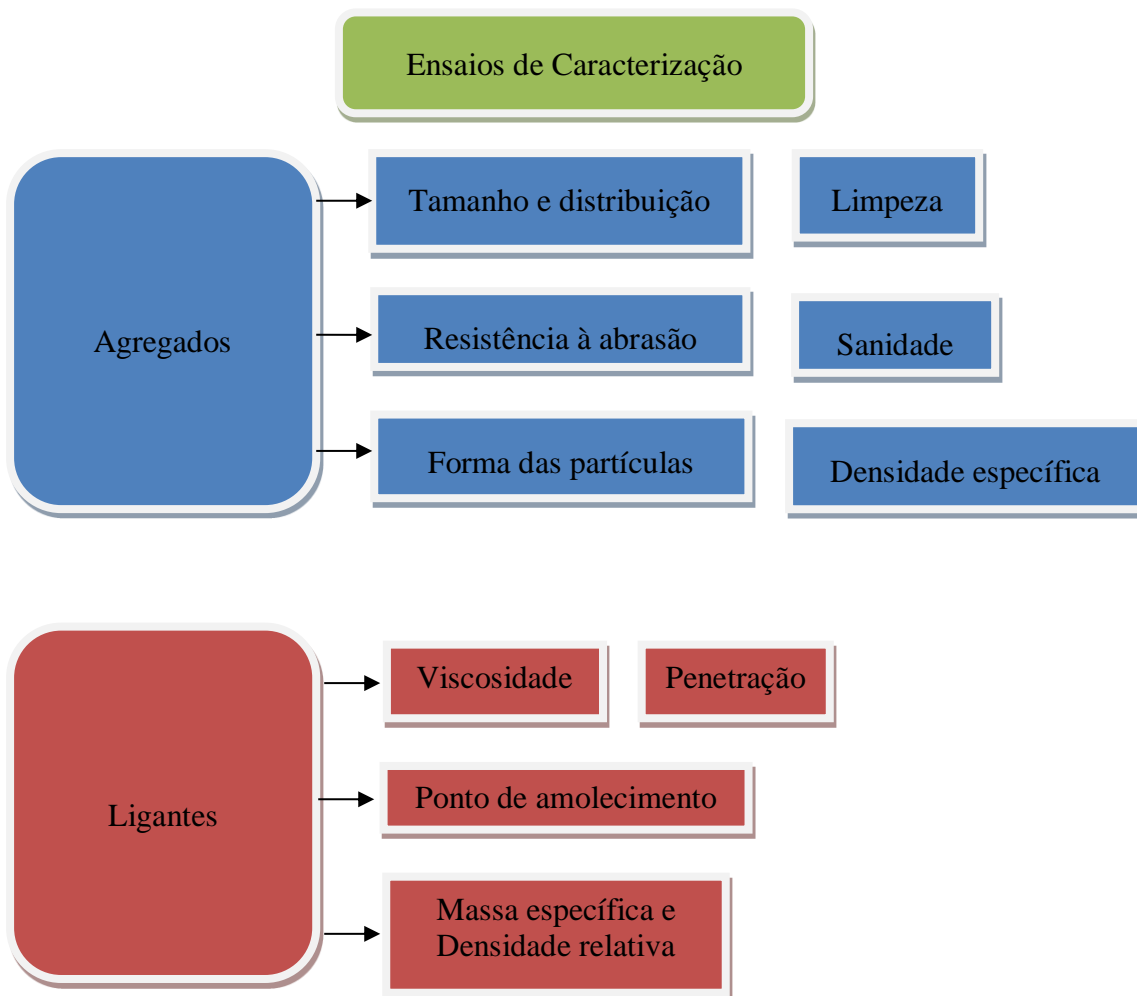


Figura 7: Quadro representativo dos ensaios

3.2. Limpeza

O ensaio de equivalência de areia tem por objetivo determinar a pureza de um solo em relação à porcentagem de argila que contém (Senço, 2007). É a relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo ou de agregado miúdo, numa proveta, em condições estabelecidas pela Metodologia descrita na norma DNER-ME 054/97.

A amostra ensaiada foi obtida com o material passante na peneira de 4,8mm sendo dissolvida dentro de uma proveta de 32 mm de diâmetro interno e 43 cm de altura, numa solução concentrada preparada previamente, com 5 litros de volume, contendo:

557 g de cloreto de cálcio anidro, 2.510 g de glicerina e 57,5 g de formaldeído a 40% em volume.

Esse ensaio seguiu a norma DNER-ME 054/97 onde dissolvemos 125 mililitros da solução concentrada, previamente preparada em água destilada, até completar 5 litros. Essa solução de trabalho é sifonada para a proveta até o traço de referência que fica a 10 cm da base. A amostra foi transferida para a proveta, com auxílio de um funil que ficou em repouso por 10 minutos. Após esse tempo, fechou-se a proveta e agitou-se vigorosamente executando 90 ciclos em 30 segundos. Após a agitação introduziu-se um tubo lavador até o fundo da proveta, lavando-se as paredes dela.

Com o tubo lavador, agitou-se a camada de areia para levantar o material argiloso até o nível de referência que fica a 38 cm da base. Depois disso, deixou-se o material repousar por 20 minutos e fez-se a leitura do nível superior da suspensão argilosa com precisão de 2 mm. Em seguida introduziu-se um pistão para a determinação do nível superior da camada de areia.

O valor do equivalente de areia é a relação:

$$E_a = (d_2 / (380 - d_1)) \cdot 100 \quad (3.1)$$

Sendo d_1 = distância do traço de referência superior da proveta ao nível da suspensão argilosa, em mm;

d_2 = distância do topo do disco que se apoia na boca da proveta à base inferior do cilindro do pistão quando a sapata estiver apoiada na areia, em mm;

Foram preparadas 4 amostras por prevenção caso houvesse alguma discrepância nos valores.



Figura 8: Ensaio equivalente de areia

Os valores encontrados foram coerentes e assim o resultado do ensaio foi obtido de uma média aritmética de três determinações, arredondando-se para o número inteiro.

$$EA_1 = 6,5/(38 - 29,5) = 76\% \quad (3.2)$$

$$EA_2 = 6,5/(38 - 29) = 72\% \quad (3.3)$$

$$EA_3 = 6,5/(38 - 29,2) = 74\% \quad (3.4)$$

$$EA = 74\%.$$

Assim, conclui-se que o agregado utilizado atende a especificação, pois, para que um agregado possa ser utilizado em concreto asfáltico, o equivalente de areia deve ser de pelo menos 55% (Bernucci, 2008).

3.3. Resistência à abrasão

Resistencia dos agregados é característica das mais importantes, tendo em vista as funções que um agregado deve exercer quando componentes das camadas de um pavimento (Senço, 2007).

A composição granulométrica das amostras destinadas aos ensaios indica que os resultados devem referir-se à rocha de onde se origina o agregado. Resultados favoráveis nos ensaios de abrasão indicam que os agregados não deverão sofrer quebras e fraturas significativas quando sujeitos à ação dos rolos compressores, na construção, e do tráfego, na operação (Senço, 2007).

A degeneração da granulometria devido ao uso de um agregado de baixa resistência pode levar o pavimento à ruína total, pois o produto final não atende mais às condições impostas para a aceitação do material (Senço, 2007)

Para avaliar a resistência à abrasão foi realizado o ensaio de abrasão Los Angeles. Nesse ensaio uma amostra de 5.000g conforme a Tabela 1 do DNER-ME 035/98 foi submetida a 500 revoluções com 12 esferas de aço padronizadas. Vale ressaltar que tais valores de massa, revoluções e número de esferas foram escolhidos em função da curva granulométrica Gap-graded com valores máximos e mínimos referentes a ADOT. O resultado é avaliado pela redução de massa dos agregados retidos na peneira de nº 12 (1,7 mm) em relação à massa inicial específica, conforme a Eq. **X.x**:

$$LA = ((m_i - m_f)/m_i).100 \quad (3.5)$$

Sendo m_i 4.953 g e m_f 4.169 g.

Logo, $LA = 16\%$.

As especificações brasileiras que envolvem o uso de agregados em camadas de base e revestimento de pavimentos, normalmente limitam o valor da abrasão Los Angeles (LA) entre 40 e 55% (Ceratti, 2011). O agregado atende as especificações.



Figura 9: Ensaio Abrasão Los Angeles

3.4. Ensaio de avaliação da durabilidade do agregado pelo de soluções de sulfato – Sanidade-

Alguns agregados que inicialmente apresentam boas características de resistência podem sofrer processos de desintegração química quando expostos às condições ambientais no pavimento. Determinados basaltos, por exemplo, são suscetíveis à deterioração química com formação de argilas (Bernucci, 2008).

A característica de resistência à desintegração química é quantificada através de ensaio que consiste em atacar o agregado com solução saturada de sulfato de sódio ou magnésio, em cinco ciclos de imersão com duração de 16 a 18 horas, à temperatura de 21°C, seguidos de secagem em estufa. A perda de massa resultante desse ataque químico ao agregado deve ser de no máximo 12% (Bernucci, 2008). O método DNER-ME 089/94 apresenta o procedimento desse ensaio. A Figura 10 mostra os materiais utilizados nesse ensaio.

Este método tem por objetivo determinar a resistência à desintegração dos agregados sujeitos à ação do tempo, pelo ataque de soluções saturadas de sulfato de sódio ou de magnésio (DNER-ME 089/94).

Para a realização deste ensaio foi preparado soluções de sulfato de sódio dissolvendo-se uma quantidade de sal tal que, a uma temperatura entre 25°C e 30°C, assegure-se, não só a saturação, mas também a presença de excesso de cristais nas soluções, após a preparação. Durante a adição do sal as soluções foram vigorosamente agitadas em intervalos frequentes até sua utilização. Depois de prontas, as soluções foram resfriadas à temperatura de 21°C, e mantidas nesta temperatura por 48 horas antes da realização do ensaio.



Figura 10: Ensaio Sanidade

A amostra foi imersa na solução de sulfato de sódio por um período de 18 horas, de tal modo que o nível da solução ficou 1 cm acima da amostra. Após o período de imersão a amostra foi retirada da solução e colocada em estufa para secar a 105°C – 110°C, até a constância de peso. O processo de imersão e secagem alternadas constitui um ciclo, que foram repetidos cinco vezes.

Para a curva granulométrica Gap-Graded da ADOT adota-se para a pesquisa a dimensão máxima do agregado é 19 mm. Então conforme a norma foi ensaiada 1.000g do material passante na peneira 19 mm a 9,5 mm consistindo de 67% de material entre 19 mm e 12,7 mm e 33% de material entre 12,7 mm e 9,5 mm. Para as demais peneiras: 0.3 mm, 0.6 mm, 1.2 mm, 2.4 mm, 4.8 mm e 9.5 mm foram ensaiados amostras de 110g.

Segue a tabela dos resultados que indicam que o agregado utilizado é resistente à desintegração ao ataque de soluções saturadas de sulfato de sódio, pois a maior perda foi no material graúdo (5,8 %), porém até 10% de perda é considerado um material aceitável.

Tabela 2: Ensaio Sanidade

Material passante na peneira de 9,5 mm					
Passante	Retido		Peso	% de	% de perda
mm	mm	%	antes	Perda	corrigida
Material passante na peneira de 9,5 mm					
0,6	0,3	7,1	110	0,9636	6,8418182
1,2	0,6	7,1	110	0,9873	7,0096364
2,4	1,2	7,1	110	0,98	6,958
4,8	2,4	7,1	110	0,9903	7,0309364
9,5	4,8	7,1	110	0,9636	6,8418182
	Total		550		3,46822091
Material retido na peneira de 4,8					
19	12,7	42,88	670	0,9293	3,984832
12,7	9,5	21,12	330	0,8908	1,881344
			1000		5,866176

3.5. Determinação da absorção e da Densidade de agregado graúdo

Para a realização deste ensaio seguiu-se a metodologia de ensaio do DNER-ME 081/98. Inicialmente desprezou-se todo o material passante na peneira 4,8 mm através de peneiramento a seco.

A massa da amostra de 4kg foi escolhida de acordo com o critério da tabela 1 da norma DNER-ME 081/98. Em seguida lavou-se a amostra sobre a peneira 4,8 mm e secou em estufa até constante massa. Subsequentemente, imergiu-se o agregado em água por 24h tendo-se o cuidado de agitar algumas vezes para expulsar as bolhas de ar do material. Após esse período removeu-se a amostra da água e espalhou-se sobre um pano absorvente até que as películas visíveis de água foram eliminadas.

Imediatamente após imergiu-se a amostra acoplada a haste do recipiente no prato da balança hidrostática. Procedeu-se a leitura conforme a figura 11.



Figura 11: Balança hidrostática

Por fim, o agregado foi aquecido em estufa por 3 horas para determinar a massa seca (M_s).

A Densidade aparente do agregado na condição seca em estufa foi determinada através da seguinte expressão:

$$D_{ap} = M_s / (M_h - L) \quad (3.6)$$

Onde:

D_{ap} = densidade aparente

M_s = massa, ao ar, do agregado seco em estufa.

M_h = massa, ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca.

L = leitura na balança correspondente ao agregado submerso, em g (pesagem hidrostática).

Assim, o valor da densidade aparente do agregado é 2,71.

Para a absorção, o valor foi obtido através da seguinte expressão:

$$A = [(M_h - M_s) / M_s] \times 100 \quad (3.7)$$

Assim, o valor da absorção é de 0,69%.

Determinação da densidade real – Agregado miúdo

Para a realização deste ensaio seguiu-se a metodologia de ensaio do DNER-ME 084/95.

A densidade determinada por este método é a relação da massa de determinado volume de amostra à 25°C para a massa de igual volume de água destilada `mesma temperatura.

Primeiramente obteve-se uma amostra de 1.000g por quarteamento, separando-se 500g após um peneiramento nas peneiras de aberturas de 4,8 e 0,075 mm.

Com uma balança registrou-se a massa do picnômetro vazio e seco, picnômetro mais amostra, picnômetro mais amostra mais água e por fim picnômetro cheio d'água em g.

A densidade real do agregado miúdo é dada pela fórmula:

$$D_{25} = (b - a) / (d - a) - (c - b) \quad (3.8)$$

Em que:

D_{25} = densidade real de agregado miúdo, a 25/25°C;

a = massa do picnômetro vazio e seco, em g = 278,93g;

b = massa do picnômetro mais amostra, em g = 778,93g;

c = massa do picnômetro mais amostra mais água, em g = 955,49g;

d = massa do picnômetro cheio d'água, em g = 636,51g.



Figura 12: densidade real – agregado miúdo

Assim, o valor da densidade real de agregado miúdo é 2,76.

3.6. Partículas alongadas e achatadas

Partículas alongadas e achatadas são expressas pela porcentagem em massa de agregado graúdo que tem a razão entre a dimensão máxima e a dimensão mínima maior do que 5, sendo indesejáveis porque têm a tendência de quebrarem durante o processo de construção e sob a ação do tráfego (Bernucci, 2008). Essa razão é determinada através do método ASTM D 4791 na fração do agregado graúdo maior do que 4,75mm. A Figura 13 mostra o equipamento utilizado.



Figura 13: Partículas alongadas e achatadas

O valor máximo para angularidade e partículas alongadas é de 10%. Nosso material obteve valores de 15%, porém, é o único material disponível para a pesquisa.

3.7. Ensaio de ponto de amolecimento

O ponto de amolecimento é uma medida empírica que correlaciona a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido sob certas condições particulares e atinge uma determinada condição de escoamento. Nesse ensaio uma de aço de dimensões e peso especificados foi colocada no centro de uma amostra de asfalto que está confinada dentro de um anel metálico padronizado conforme a norma DNIT 131/2010 - ME. Todo o conjunto foi colocado dentro de um banho de água num bequer conforme a figura 14. O banho foi aquecido até o asfalto amolecer e não mais suportar o peso da bola. A temperatura foi marcada no instante em que a mistura amolecida tocou a placa do fundo do conjunto padrão de ensaio. Os testes foram realizados com duas amostras do mesmo material. Ressalta-se que se a temperatura entre as duas amostras exceder 2°C, o ensaio deve ser feito. Foram realizados o ensaio de ponto de amolecimento para o Cap50/70, mistura CAP 50/70 e 30% de Pellet e mistura CAP 50/70 com 25% de RAR. Para as

misturas com RAR a 30% e 35% não foram possíveis ser realizados, pois, o material acabou. A Tabela 3 a seguir ilustra os valores encontrados.



Figura 14: Ensaio ponto de amolecimento

Tabela 3: Ensaio ponto de amolecimento

Ponto de amolecimento	CAP 50/70	CAP + Pellet	CAP + RAR
Temperatura °C	48	56,1	56

Tanto o ligante convencional quanto os modificados com borracha atenderam as especificações quanto a temperatura de amolecimento entre 30°C e 80°C.

Esse ensaio é classificatório em especificações brasileira e europeia, e é empregado para a estimativa de suscetibilidade térmica (Sousa, 2008).

A viscosidade é uma medida da consistência do cimento asfáltico, por resistência ao escoamento (Bernucci, 2008).

Para esta pesquisa foi utilizado o viscosímetro Brookfield conforme a figura 15. Este equipamento permite medir as propriedades de consistência relacionadas ao bombeamento e à estocagem. Permite ainda obter gráfico de temperatura-viscosidade para projeto de mistura asfáltica, por meio de medida do comportamento do fluido a diferentes taxas de cisalhamento e a diferentes tensões de cisalhamento, obtidas por rotação de cilindros coaxiais que ficam mergulhados na amostra em teste (ABNT NBR 15184; ASTM D 4402/02). É uma medida da viscosidade dinâmica expressa em centipoise (cP) (Bernucci, 2008). O ensaio foi realizado com 70% de CAP 50/70 e 30% Pellet.



Figura 15: Ensaio de Viscosidade

Tabela 4: Ensaio de Viscosidade

	[cP]			
T°C	1° leitura	2° leitura	3° leitura	Média
135	3029	2950	2933	2970,667
140	2546	2367	2258	2390,333
145	1808	1783	1921	1837,333
150	1521	1483	1489	1497,667
155	1271	1250	1296	1272,333
160	1025	990	968	994,3333
165	873	853	855	860,3333
170	758	760	745	754,3333
175	720	718	700	712,6667
177	698	700	720	706

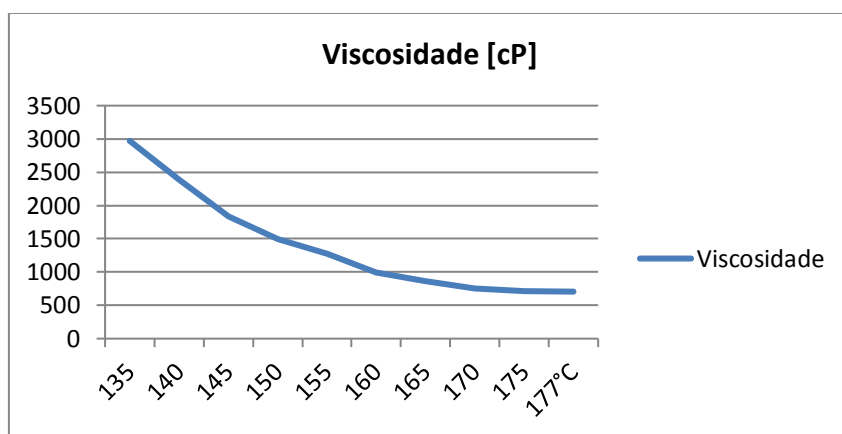


Figura 16: Gráfico Viscosidade x T°C

3.8. Ensaio de massa específica e densidade relativa

A massa específica do ligante asfáltico é obtida por meio de picnômetro para a determinação do volume do ligante e é definida como a relação entre a massa e o volume. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 6296/2004.



Figura 17: Ensaio de Massa Específica

O CAP 50/70 ensaiado tem massa específica de 1,01g/cm³.

3.9. Ensaio de penetração

O ensaio de penetração consiste na medição da profundidade em décimos de milímetro, quem uma agulha de massa padronizada (100g) penetra numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, por 5 segundos, à temperatura de 25°C. Para a realização deste ensaio seguiu-se como referência a NBR 6576/98. Em cada ensaio, três medidas individuais de penetração foram realizadas e o adotado sendo a média. Esse ensaio foi empregado para a classificação dos CAPs. Foram realizados ensaio de penetração para o CAP 50/70, CAP 50/70 com 30% de Pellet e CAP 50/70 e 25% RAR.

Para os teores de 30% e 35% de RAR não foi possível devido a falta da borracha.

A tabela 5 ilustra os valores obtidos.

Tabela5: Ensaio de Penetração

Penetração	CAP 50/70	CAP + Pellet	CAP + RAR
Décimos de mm	51	58	57

O material atende as especificações.



Figura 18: Ensaio de Penetração

4. DOSAGEM SUPERPAVE

A dosagem consiste na determinação experimental de um teor de projeto de ligante através de uma faixa granulométrica pré-definida.

O teor de projeto de ligante asfáltico varia de acordo com o método de dosagem, e é função de parâmetros como energia de compactação, tipo de mistura, temperatura a qual o pavimento estará submetido, entre outros. O método de dosagem mais usado mundialmente faz uso da compactação por impacto e é denominado método Marshall.

O Método Marshall faz o uso da compactação por impacto. Porém na década de 80 muitas rodovias norte-americanas apresentaram deformações permanentes prematuras onde os engenheiros alegaram que estas patologias se davam ao excesso de ligante asfáltico, pois a compactação por impacto gerava corpos de provas que não eram compatíveis em densidade com os de campo. Esse assunto foi abordado em um estudo denominado *Strategic Highway Research Program* (SHRP) que resultou em uma metodologia chamada Superpave onde a compactação se dá por amassamento que vem sendo utilizado em algumas pesquisas recentes no Brasil.

Segundo pesquisadores do programa norte-americano Superpave, em relação aos agregados, há um consenso de que suas propriedades têm influência direta no

comportamento dos revestimentos asfálticos quanto a deformações permanentes, e afetam, embora em menor grau, o comportamento relacionado ao trincamento por fadiga e por baixas temperaturas (Ceratti, 2011).

Ao invés de preparar os corpos de prova por impacto o método Superpave propõe uma forma diferente de preparação do corpo de prova de misturas asfálticas, empregando o compactador giratório (Figura 19). Trata-se de um equipamento prático, que apresenta às seguintes características básicas: ângulo de rotação de $1,25 \pm 0,02^\circ$; taxa de 30 rotações por minuto; tensão de compressão vertical de 600 kPa; capacidade de produzir corpos de prova com diâmetros de 150,0 mm e 100,0 mm (Motta, 2010; Estefen, 2010).

Para a realização da compactação dos corpos de prova, CP, foram definidos os esforços de alto volume de tráfego utilizados para a determinação do volume de vazios da mistura.

Esses esforços são: N_{inicial} , esforço de compactação inicial; N_{projeto} , esforço de compactação de projeto que é tal que o volume de vazios (V_v) deve ser igual a 4,0% neste ponto de compactação; e $N_{\text{máximo}}$, esforço de compactação máximo, que representa a condição de compactação da mistura ao fim da vida de serviço da mesma que deve ser sempre $\geq 2,0\%$ de V_v (Motta, 2010; Estefen, 2010). Conforme a Tabela 6, para um alto volume de tráfego os esforços N_{inicial} , N_{projeto} e $N_{\text{máximo}}$ são 9, 125 e 205 respectivamente.



Figura 19: Compactador Giratório

Os esforços de compactação N_{inicial} e $N_{\text{máximo}}$ são usados para avaliar a trabalhabilidade da mistura. O N_{projeto} , número de giros de projeto, é usado para selecionar o teor de ligante de projeto. Esses valores variam em função do tráfego (N), conforme apresentados na Tabela 6 (AASHTO, 2001).

Tabela 6: Número de giros especificados na norma de dosagem Superpave. Fonte: AASHTO (2001)

Parâmetros de compactação			Tráfego
N _{inicial}	N _{projeto}	N _{máximo}	
	50	75	Muito leve (local)
7	75	115	Médio (rodovias coletoras)
8	100	160	Médio a alto (vias principais, rodovias rurais)
9	125	205	Alto volume de tráfego (interestaduais, muito pesado)

Como dito anteriormente, apesar de a RAR poder ser utilizada em misturas densas, optou-se por utilizar a granulometria *gap-graded*, pois conforme a prática na Califórnia o asfalto borracha não é recomendado em misturas densas devido ao espaço insuficiente para acomodar o ligante ao ponto de melhorar significativamente o desempenho do pavimento.

Com o objetivo de aumentar a vida útil, oferecer mais segurança aos usuários e diminuir custos, o DER-RJ elaborou a Instrução Técnica seguindo às determinações do Decreto n° 43.086, de 18 julho de 2011, publicado em 19/07/2011, às recomendações da ASTM, da *Rubber Pavements Association* (RPA), do *Arizona Department of Transportation* – EUA (ADOT), DNIT, além de Instruções Técnicas (IT) do DER-RJ. Esta Instrução Técnica utiliza a granulometria “*Gap Graded*”.

Em relação à granulometria, Bernucci (2007) defini graduação descontínua como sendo uma curva granulométrica com proporção dos grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por certa quantidade de finos, de forma a ter uma curva descontínua em certas peneiras, com o objetivo de tornar o esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente com o maior número de contatos entre os agregados graúdos. Exemplo: matriz pétreo asfáltica (*stone matrix asphalt* – SMA); mistura sem agregados de certa graduação (*gap-graded*).

De acordo com a Instrução Técnica n° 67 apud Souza, M. L (2000) a granulometria *Gap Graded* deve ter comportamento uniforme, em no máximo duas fases para determinada espessura de agregado, com percentual pequeno de pedregulho e material fino e índice de forma superior a 0,5% (meio por cento); (DNER-ME 086/94). Para este trabalho adotou-se a curva granulométrica referência da ADOT por possuir as peneiras

disponíveis no laboratório. A Figura 20 exemplifica a curva de distribuição granulométrica adotada.

Curva granulométrica Gap-Graded referência ADOT		
ASTM	Abertura (mm)	Porcentagem passando
3/4"	19.100	100
1/2"	12.700	95.9
3/8"	9.500	77.9
N. 4	4.800	37.2
N. 10	2.000	22.1
N. 40	0.425	10.6
N. 200	0.075	2.8

Figura 20: Curva Granulométrica Gap-Graded referência ADOT

Em relação aos agregados, esta Instrução Técnica orienta que agregados graúdos e miúdos devem ser livres de torrões de argila e de substâncias nocivas. A porcentagem de desgaste no ensaio de abrasão Los Angeles (DNER-ME) não deve ser superior a 42% e para o ensaio de Durabilidade deve-se ter perda inferior a 12% (DNER-ME 086/94) para agregados graúdos e 15% para miúdos (DNER-ME 086/94). Para o ensaio de equivalente de areia (DNER-ME 54/97) deve ser igual ou superior a 55%.

Segundo a Instrução Técnica nº 67 (DER-RJ) a composição da mistura asfáltica deve satisfazer os requisitos da Tabela 7.

Tabela 7: Granulometria da *Gap-Graded* (Fonte Instrução Técnica nº 67 (DER-RJ)).

Abertura (mm)	Porcentagem passando em peso		Desvio Padrão
	A	B	
19,1	100	100	±5
13,2	90 – 100	0	±5
12,7	0	80 – 100	±5
9,5	50 – 70	65 – 80	±5
4,75	18 – 30	28 – 42	±3
2,36	10 – 22	14 – 22	±1,5
0,074	0 – 5	0,0 - 2,5	±0,5

O primeiro passo do procedimento Superpave consiste na escolha de três composições granulométricas com os materiais à disposição. O passo seguinte é a compactação de corpos-de-prova (CGS) com um teor de tentativa para cada mistura (dois corpos-de-prova por mistura), obtido por meio de estimativas usando-se a massa específica efetiva dos agregados. Dessas misturas experimentais se obtêm as propriedades volumétricas (V_v , VAM e RBV) após a compactação dos corpos-de-prova no compactador giratório com o número de giros de projeto (determinado em função do tráfego, conforme visto mais adiante). Este primeiro passo objetiva-se em calcular um teor de ligante inicial estimado para se atingir os 4% vazios. Considera-se tal teor aquele no qual os vazios dos agregados não absorvem mais ligante. Tal consideração implica que quantidades de ligante iguais ou maiores que este teor comporão uma mistura de agregados com massa específica efetiva constante (Bernucci, 2008).

Devido à escassez de material o valor do teor de ligante inicial estimado de 8,3% foi adquirido da pesquisa da mestrandia Letícia Nunes Cardoso a qual também concorrentemente pesquisa sobre a incorporação da RAR. Para encontrar tal valor, primeiramente calculou-se a massa específica efetiva da composição de agregados (G_{se}) considerando máxima absorção de ligante pelos vazios dos agregados através das seguintes expressões:

$$G_{se} = \frac{100 - P_l}{\frac{100}{G_{mm}} + \frac{P_l}{G_l}} \quad (4.1)$$

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{P_{ag}}{G_{se}} + \frac{P_l}{G_l}} \quad (4.2)$$

Onde:

G_{sb} = massa específica aparente da composição de agregados, g/cm³;

G_{mm} = Densidade Máxima Teórica (G_{mm}) - ASTM D 2041

P_{ag} = percentual de agregados na mistura, % em massa, dado por $(1 - P_l)$;

P_l = teor de ligante, % em massa (admitido para uma determinada faixa granulométrica, por exemplo, 5%);

G_l = massa específica do ligante, g/cm³;

Posteriormente calculou-se o volume de ligante absorvido (V_{la}). Para isso assumiu-se o teor de ligante, P_l igual a 5% e consequentemente 95% de teor de agregado, P_{ag} , ambos em massa:

$$V_{la} = \frac{P_{ag} \times (1 - V_v)}{\left(\frac{P_l}{G_l} + \frac{P_{ag}}{G_{se}} \right)} \times \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}} \right) \quad (4.3)$$

Onde:

V_v = Volume de vazios (4%).

Em seguida calculou-se o volume de ligante efetivo (V_{le}) através da seguinte expressão:

$$V_{le} = 0,081 - 0,02931 \times \ln(TMN) \quad (4.4)$$

Onde:

TMN = tamanho máximo nominal de peneira para a composição de agregados, polegadas (19 mm).

Por fim, encontrou-se o valor da estimativa do teor de ligante inicial (P_{li}) através da seguinte expressão:

$$P_{li} = \left[\frac{G_l \times (V_{le} + V_{la})}{[G_l \times (V_{le} + V_{la}) + M_{ag}]} \right] \times 100 \quad (4.5)$$

Onde:

M_{ag} = massa de agregado, g;

Adquirido o valor de ligante inicial, realizou-se a compactação de 20 corpos de prova, sendo 8 para a mistura com 30% de borracha Pellet, 4 para a mistura com 25% de RAR e 8 para a mistura com 30% de RAR, cada par variando os teores (+0,5 e 1,0% em relação ao teor inicial). A pretensão inicial era realizar a dosagem para a mistura com 25%, 30% e 35% de RAR e 30% de Pellet, porém não foi possível finalizar com 35% de RAR, pois a RAR acabou.

Determinação do teor de ligante de projeto com incorporação de 30% de Pellet no ligante:

Adquirido o valor de 8,3% de teor de ligante inicial (P_{li}), separou-se o agregado conforme a granulometria da tabela 8 variando-se o teor de ligante, sendo 2 CPs no teor

de ligante inicial (P_{li}), bem como em mais três outros teores ($-+0,5$ e $1,0\%$ em relação ao P_{li}). O agregado foi aquecido a 180°C , em função da temperatura de compactação do ligante, seguindo a recomendação que o agregado deve estar a 15°C acima da temperatura do ligante, pois, tem maior susceptibilidade térmica (Cerrati, 2011).

Tabela 8: Granulometria Gap-Graded

Dosagem SUPERPAVE para GAP-GRADED						
Teor provável de asfalto (%)						
Quantidade total de mistura (gr)			5000	5000	5000	5000
Fração		%	7.8	8.3	8.8	9.3
Passante 3/4" retido 1/2"	AG. GRAÚDO	4.1	189.01	187.985	186.96	185.935
Passante 1/2" retido 3/8"		18	829.8	825.3	820.8	816.3
Passante 3/8" retido N4		40.7	1876.27	1866.095	1855.92	1845.745
Passante N4 retido N10	AG. MIÚDO	15.1	696.11	692.335	688.56	684.785
Passante N10 retido N40		11.5	530.15	527.275	524.4	521.525
Passante na N40 retido N200		7.8	359.58	357.63	355.68	353.73
Passante N200 retido Fundo	FÍLER	2.8	129.08	128.38	127.68	126.98
Ligante asfáltico			390	415	440	465
TOTAL (gr)						

Realizou-se a compactação de 8 corpos de prova conforme a figura 21. A compactação foi realizada no CGS, com pressão aplicada de 600kPa e o ângulo de rotação de $1,25^{\circ}$. Destaca-se o fato da mistura não-compactada permanecer em estufa à temperatura de compactação (150°C) (função da viscosidade do ligante) por um período de 2 horas antes da compactação, de modo a simular o envelhecimento de curto prazo durante a usinagem.



Figura 21: Corpo de prova compactado

Realizada a compactação de um corpo-de-prova, foi feita a pesagem (a seco, submersa e superfície saturada seca) (ASTM D 3203-94) para determinação do V_v da mistura compactada para três esforços de compactação (número de giros):

- N_{inicial} , esforço de compactação inicial (9 giros);
- N_{projeto} , esforço de compactação de projeto (125 giros) (no qual V_v deve estar entre 4 a 6%);
- $N_{\text{máximo}}$, esforço de compactação máximo (205 giros) (representa a condição de compactação da mistura ao fim da sua vida de serviço).

Durante o processo de compactação, a massa específica do CP foi monitorada em função da altura. Esta massa específica, referida como percentual da G_{mm} , pode ser plotada *versus* o número de giros (ou *versus* o logaritmo do número de giros) – Figura 26. Este processo permite avaliar a compatibilidade da mistura, ou seja, sua trabalhabilidade e seu potencial de densificação, que depende do esqueleto mineral (agregados) (Bernucci, 2008).

Após a compactação, os corpos de prova foram desfeitos para a obtenção da G_{mm} pelo procedimento com vácuo descrito pelo método norte-americano ASTM D 2041 (2000). A figura 22 ilustra realização do ensaio.

Para a realização do ensaio pesou-se, inicialmente, 1.500g da mistura (para tamanho máximo nominal de até 19,1mm) em um recipiente de massa conhecida. Em seguida, foi preenchido com água a 25°C até que toda a mistura ficasse coberta. Foi então aplicada uma pressão de vácuo residual no recipiente de 30mmHg (aplicação de 730mmHg), por um período de 15 minutos, a fim de expulsar o ar existente entre os agregados recobertos pelo filme de ligante, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 23.



Figura 22: Ensaio RICE

Observe-se nesse procedimento, que a temperatura de ensaio gira em torno da temperatura ambiente, não havendo desestruturação de grumos formados por agregados e ligante asfáltico. A permanência desses grumos faz com que os vazios existentes entre os dois materiais permaneçam sem alteração, tendo o vácuo a função apenas de expulsão do ar entre os grumos (Figura 23) (Bernucci, 2008).



Figura 23

Após o período de vácuo, é restabelecida a pressão ambiente no recipiente. Completou-se então com água o volume do recipiente. O conjunto (recipiente, mistura asfáltica e água) foi imerso em banho térmico para obtenção de equilíbrio de temperatura e posteriormente pesado.

A vantagem do procedimento descrito é a obtenção da massa específica da mistura asfáltica sem a necessidade da obtenção das massas específicas dos seus constituintes separadamente, além de já considerar a absorção de ligante pelos agregados (Bernucci, 2008).

A G_{mm} é determinada pela expressão 4.6:

$$G_{mm} = \frac{A}{A + B - C} \times 0,9971 \quad (4.6)$$

Onde:

A = massa da amostra seca em ar, g;

B = massa do recipiente com volume completo com água, g;

C = massa do recipiente + amostra submersa em água, g.

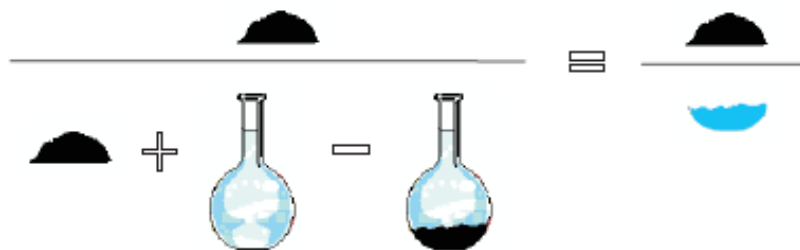


Figura 24: Massas consideradas para o cálculo da *Gmm* (Bernucci, 2008)

Resultados da compactação por amassamento (CGS) para mistura com 30% de Pellet.

Como dito anteriormente, foram compactados 8 corpos de prova, sendo cada par a variação de $-0,5$ e $1,0\%$ em relação ao P_{li} . Para sintetizar o trabalho serão apresentadas apenas as planilhas dos teores de projeto encontrado, ou seja, os que mais se aproximaram do volume de vazios igual a 4% . A tabela 9 a seguir exemplifica os critérios volumétricos para a determinação do teor de projeto.

Tabela 9: Critérios volumétricos para teor de projeto

Esforço de compactação (número de giros)	Relação entre massa específica aparente e a <i>Gmm</i> (%)	Vv (%)
$N_{inicial}$	$< 89\%$	$> 11\%$
$N_{projeto}$	96%	4%
$N_{máximo}$	$< 98\%$	$> 2\%$

Segui a tabela 10 com os resultados da compactação por amassamento para o teor de projeto encontrado, CP 3A (8,8%).

Tabela 10: Resultados compactação CP 3A (8,8%) - Pellets

CP 3A	
% Ligante	0,088
Massa da amostra (g)	5000

Massa da amostra (g)	4643,2				
G_{mm} (g/cm ³)	2,455				
Nº de giros	Altura (mm)	$G_{mb, estimada}$ (g/cm ³)	$G_{mb, corrigida}$ (g/cm ³)	% Gmm	Va (%)
9	125,5	2,094	2,092	85,2	14,8
15	122,2	2,150	2,149	87,5	12,5
30	118,0	2,227	2,225	90,6	9,4
45	115,9	2,267	2,265	92,3	7,7
60	113,9	2,307	2,305	93,9	6,1
75	113,6	2,313	2,311	94,1	5,9
100	112,4	2,338	2,336	95,1	4,9
115	111,9	2,348	2,346	95,6	4,4
125	111,7	2,352	2,351	95,7	4,3
135	111,4	2,359	2,357	96,0	4,0
145	111,2	2,363	2,361	96,2	3,8
155	111,0	2,367	2,365	96,3	3,7
165	110,8	2,371	2,370	96,5	3,5
175	110,6	2,376	2,374	96,7	3,3
185	110,4	2,380	2,378	96,9	3,1
195	110,3	2,382	2,380	97,0	3,0
200	110,2	2,384	2,383	97,0	3,0
205	110,1	2,386	2,385	97,1	2,9
G_{mb} (medida)	-	2,383	-	-	-

Determinação de G_{mb} - AASHTO T 166	
Massa seca - A (g)	4642,2
Massa submersa - C (g)	2698
Massa saturada superfície seca - B (g)	4646,4
G_{mb} (g/cm ³)	2,383

Para $N_{projeto}$	G_{mb} (g/cm ³)	2,351
--------------------	-------------------------------	-------

Composição da Mistura	
% de agregado (P_s)	0,912
% da fração graúda (P_{CA})	0,628
% da fração miúda	0,344
Massa de Ligante (g)	440,0
Massa do agregado (g)	4560
Massa da fração graúda (g)	2863,68
Massa da fração miúda (g)	1568,64

Segui a tabela 11 com os resultados da compactação por amassamento para o teor de projeto, CP 3B (8,8%).

Tabela 11: Resultados compactação CP 3B (8,8%) - Pellets

CP 3B	
% Ligante	0,088
Massa da amostra (g)	5000

Massa da amostra (g)	4816,5				
G_{mm} (g/cm ³)	2,439				
Nº de giros	Altura (mm)	$G_{mb, estimada}$ (g/cm ³)	$G_{mb, corrigida}$ (g/cm ³)	% G_{mm}	Va (%)
9	130,2	2,093	2,101	86,2	13,8
15	127,1	2,144	2,153	88,3	11,7
30	123,0	2,216	2,224	91,2	8,8
45	121,0	2,253	2,261	92,7	7,3
60	119,7	2,277	2,286	93,7	6,3
75	118,8	2,294	2,303	94,4	5,6
100	117,7	2,316	2,325	95,3	4,7
115	117,2	2,326	2,335	95,7	4,3
125	116,9	2,332	2,341	96,0	4,0
135	116,7	2,336	2,345	96,1	3,9
145	116,5	2,340	2,349	96,3	3,7
155	116,3	2,344	2,353	96,5	3,5
165	116,2	2,346	2,355	96,5	3,5
175	116,1	2,348	2,357	96,6	3,4
185	115,9	2,352	2,361	96,8	3,2
195	115,8	2,354	2,363	96,9	3,1
200	115,8	2,354	2,363	96,9	3,1
205	115,8	2,354	2,363	96,9	3,1
G_{mb} (medida)	-	2,363	-	-	-

Determinação de G_{mb} - AASHTO T 166	
Massa seca - A (g)	4816,5
Massa submersa - C (g)	2782,1
Massa saturada superfície seca - B (g)	4820,6
G_{mb} (g/cm ³)	2,363

Para $N_{projeto}$	G_{mb} (g/cm ³)	2,341
--------------------	-------------------------------	-------

Composição da Mistura	
% de agregado (P_s)	0,912
% da fração graúda (P_{CA})	0,628
% da fração miúda	0,344
Massa de Ligante (g)	440,0
Massa do agregado (g)	4560
Massa da fração graúda (g)	2863,68
Massa da fração miúda (g)	1568,64

Com os dados do CGS estimou-se a Gmb para cada número de giros em função da altura do corpo-de-prova, através da seguinte expressão:

$$Gmb(estimada) = \frac{M_m}{V_{mx}} \quad (4.7)$$

Onde:

M_m = massa do CP, g, que independe do número de giros;

V_{mx} = volume do CP no molde durante a compactação, cm^3 , dado por:

$$V_{mx} = \frac{\pi d^2 h_x}{4} \times 0,001 cm^3/mm^3 \quad (4.8)$$

Onde:

d = diâmetro do molde (150 mm);

h_x = altura do corpo-de-prova no molde durante a compactação, mm.

Este cálculo admite que o CP seja um cilindro de laterais sem rugosidade, o que não retrata a realidade. O volume do corpo-de-prova é levemente menor que o volume do cilindro de laterais sem rugosidade devido a irregularidades superficiais (Bernucci, 2008). É por isso que a Gmb final estimada a 205 giros (2,354g/cm³) é diferente da Gmb medida após 205 giros (2,363g/cm³).

Para corrigir esta diferença a Gmb estimada a qualquer número de giros é corrigida pela razão entre a massa específica aparente medida e a massa específica aparente estimada a $N_{máximo}$, usando a seguinte expressão (Bernucci, 2008):

$$C = \frac{Gmb(medida)}{Gmb(estimada)} \quad (4.9)$$

Onde:

C = fator de correção;

Gmb (medida) = massa específica aparente medida a $N_{máximo}$;

Gmb (estimada) = massa específica aparente estimada a $N_{máximo}$.

A Gmb estimada para todos os outros números de giros pode ser corrigida usando o fator de correção por meio da seguinte expressão (Bernucci, 2008):

$$Gmb_n(\text{corrigida}) = C \times Gmb_n(\text{estimada}) \quad (4.10)$$

Onde:

$Gmbn$ (corrigida) = massa específica aparente corrigida do corpo-de-prova a qualquer giro n ;

$Gmbn$ (estimada) = massa específica aparente estimada a qualquer giro n .

Neste CP a razão é 2,363/2,354 ou 1,004. O percentual da Gmm é calculado como a razão Gmb (corrigida) para Gmm . Para se determinar o teor de projeto de uma mistura asfáltica, utilizou-se a média dos resultados referentes a dois corpos-de-prova. O gráfico da média de compactação dos dois CPs para este teor está apresentado na Figura 25.

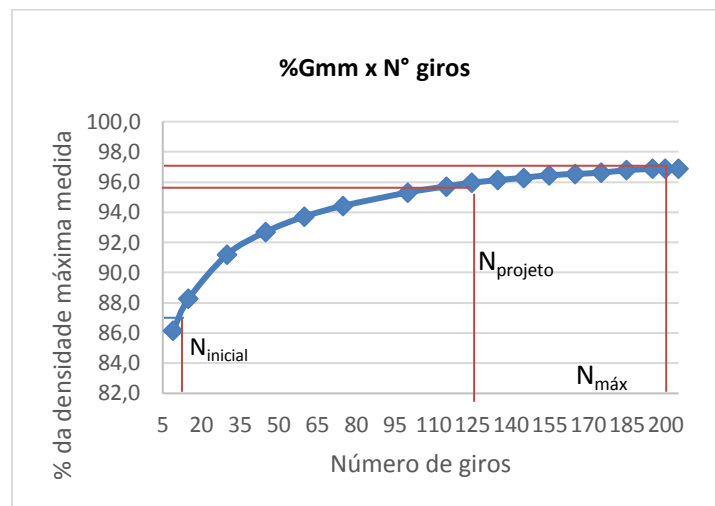


Figura 25: Gráfico % Gmm x N° de giros

As tabelas 12 e 13 ilustram os valores da Gmm e Gmb encontrados para 30% de Pellet.

Tabela 12: Gmm – 30% Pellets

Determinação da Densidade Máxima Teórica (Gmm) - ASTM D 2041				
Massa do recipiente (g)		2026,7	Tágua (oC)	25
Massa do recipiente + água (g)		7023,1		
CP	Teor	Recipiente + Amostra (g)	Recipiente + Amostra + Água (g)	Gmm
1A	7,8%	3528,2	7915,3	2,464
1B	7,8%	3528,2	7907	2,431
2A	8,3%	3528,2	7908,9	2,439
2B	8,3%	3538,2	7912,5	2,430
3A	8,8%	3528,2	7909	2,439
3B	8,8%	3529	7913,5	2,455
4A	9,3%	3530,5	7908	2,430
4B	9,3%	3529	7903,5	2,416

$$G_{mm} = \frac{A}{A+B-C} \times 0,9971 \quad (4.11)$$

Onde:

A = massa da amostra seca em ar, g;

B = massa do recipiente com volume completo com água, g;

C = massa do recipiente + amostra submersa em água, g.

Tabela 13: Gmb – 30% Pellets

Massa específica aparente da mistura compactada - AASHTO T 166				
CP	Massa seca (g)	Massa submersa (g)	Massa saturada superfície seca (g)	Gmb
1A	4689,6	2691,2	4704,3	2,330
1B	4541,1	2648,8	4553,5	2,384
2A	4703,5	2740,0	4710,4	2,387
2B	4788,5	2769,0	4793,3	2,366
3A	4816,5	2782,1	4820,6	2,363
3B	4643,2	2698,0	4646,4	2,383
4A	4802,5	2782,0	4804,9	2,374
4B	4922,1	2848,4	4923,2	2,372

$$Gmb = [A/(B-C)] \quad (4.12)$$

Onde:

A = massa da amostra seca em ar, g;

B = massa da amostra saturada superfície seca, g;

C = massa da amostra submersa em água, g.

Determinação do teor de ligante de projeto com incorporação de 25% de RAR no ligante:

Para a determinação do teor de projeto com a incorporação de 25% de RAR no ligante seguiu-se os mesmos passos do Pellet anteriormente feito. Ressalta-se que a tabela 8 foi utilizada novamente, porém os valores do ligante foram corrigidos para a proporção de 25% de RAR. Esta correção ocorre logo após a pesagem dos agregados retirados da estufa a 180°C, pois, a secagem modifica a massa do agregado, logo, este valor tem que ser corrigido. Além disso, no caso da borracha Pellet a incorporação foi feita antes da mistura. Contudo, na RAR, este processo de incorporação ocorreu no misturador. Foi possível observar na prática uma das facilidades que a RAR promove na fabricação da mistura.

Durante esta compactação, o compactador giratório deu defeito, o que impediu a realização dos 8 CPs, porém, foi possível compactar 4 CPs, sendo um de cada teor. Assim, o teor de projeto para este caso não foi a média dos dois corpos, porém, apenas do valor de cada corpo de prova com seu respectivo teor.

A tabela 9 a seguir exemplifica os critérios volumétricos para a determinação do teor de projeto.

Tabela 9: Critérios volumétricos para teor de projeto

Esforço de compactação (número de giros)	Relação entre massa específica aparente e a G_{mm} (%)	Vv (%)
$N_{inicial}$	< 89%	> 11%
$N_{projeto}$	96%	4%
$N_{máximo}$	< 98%	> 2%

Segui a tabela 14 com os resultados da compactação por amassamento para o teor de projeto encontrado, CP 2A (8,3%).

Tabela 14: Resultados compactação CP 2A (8,3%) - RAR 25%

CP 2A	
% Ligante	0,083
Massa da amostra (g)	5000

Massa da amostra (g)	4788,5				
G_{mm} (g/cm ³)	2,435				
Nº de giros	Altura (mm)	$G_{mb, estimada}$ (g/cm ³)	$G_{mb, corrigida}$ (g/cm ³)	% G_{mm}	Va (%)
9	128,3	2,112	2,079	85,4	14,6
15	124,9	2,170	2,135	87,7	12,3
30	120,8	2,243	2,208	90,7	9,3
45	118,6	2,285	2,249	92,4	7,6
60	117,2	2,312	2,276	93,5	6,5
75	116,2	2,332	2,295	94,3	5,7
100	115,0	2,356	2,319	95,3	4,7
115	114,5	2,367	2,329	95,7	4,3
125	114,2	2,373	2,335	95,9	4,1
135	113,9	2,379	2,342	96,2	3,8
145	113,7	2,383	2,346	96,3	3,7
155	113,5	2,387	2,350	96,5	3,5
165	113,3	2,392	2,354	96,7	3,3
175	113,1	2,396	2,358	96,9	3,1
185	112,9	2,400	2,362	97,0	3,0
195	112,8	2,402	2,364	97,1	2,9
200	112,7	2,404	2,366	97,2	2,8
205	112,6	2,407	2,369	97,3	2,7
G_{mb} (medida)	-	2,366	-	-	-

Determinação de G_{mb} - AASHTO T 166		
Massa seca - A (g)	4788,5	
Massa submersa - C (g)	2769,8	
Massa saturada superfície seca - B (g)	4793,3	
G_{mb} (g/cm ³)	2,366	
Para $N_{projeto}$	G_{mb} (g/cm ³)	2,335

Composição da Mistura		
% de agregado (P_s)	0,917	
% da fração graúda (P_{CA})	0,628	
% da fração miúda	0,344	
Massa de Ligante (g)	415,0	
Massa do agregado (g)	4585	
Massa da fração graúda (g)	2879,38	
Massa da fração miúda (g)	1577,24	

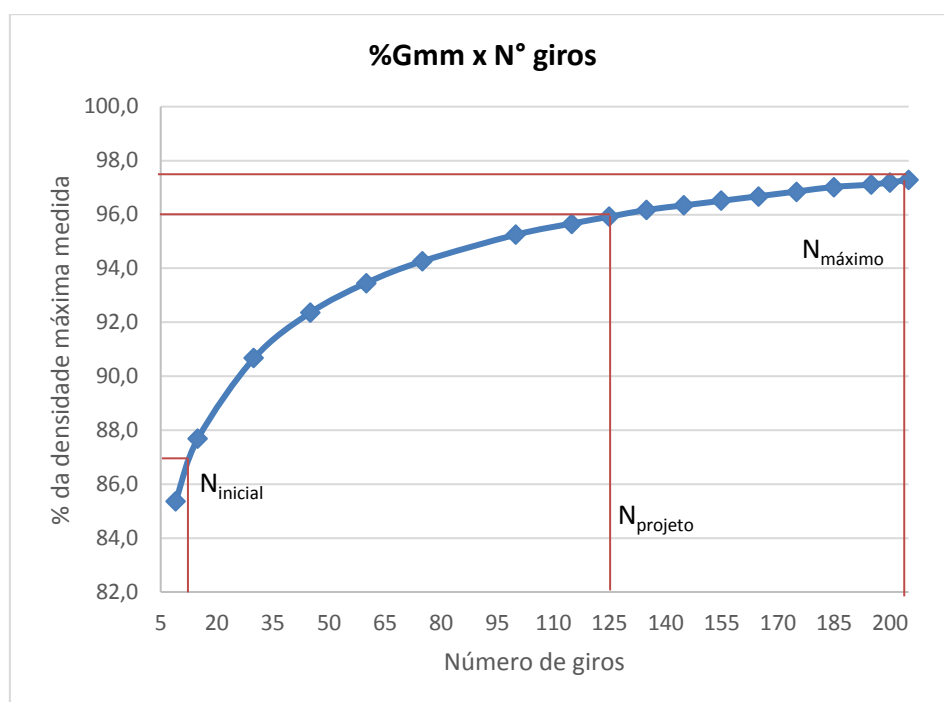


Figura 26: Gráfico % Gmm x N° de giros – RAR 25 %

As tabelas 15 e 16 ilustram os valores da Gmm e Gmb encontrados para 25% de RAR.

Tabela 15: Gmm – RAR 25%

Determinação da Densidade Máxima Teórica (Gmm) - ASTM D 2041				
Massa do recipiente (g)		2026,7	Tágua (oC)	
Massa do recipiente + água (g)		7023,1	25	
CP	Teor	Recipiente + Amostra (g)	Recipiente + Amostra + Água (g)	Gmm
1A	7,8%	3528,2	7916,3	2,468
1B	7,8%			
2A	8,3%			
2B	8,3%	3538,2	7913,8	2,435
3A	8,8%	3528,2	7903,5	2,417
3B	8,8%			
4A	9,3%	3534,2	7908	2,421
4B	9,3%	3535,2		

Tabela 16: Gmb – RAR 25%

Massa específica aparente da mistura compactada - AASHTO T 166				
CP	Massa seca (g)	Massa submersa (g)	Massa saturada superfície seca (g)	Gmb
1A	4660,2	2690,6	4677,1	2,346
1B				
2A				
2B	4681,8	2699,9	4690,1	2,352
3A	4784,6	2768,2	4790,0	2,367
3B				
4A	4922,1	2848,4	4923,2	2,372
4B	4922,1	2848,4	4923,2	2,372

Determinação do teor de ligante de projeto com incorporação de 30% de RAR no ligante:

Para a determinação do teor de projeto com a incorporação de 30% de RAR no ligante seguiu-se os mesmos passos do Pellet anteriormente feito. Ressalta-se que a tabela 8 foi utilizada novamente, porém os valores do ligante foram corrigidos para a proporção de 30% de RAR. Esta correção ocorre logo após a pesagem dos agregados retirados da estufa a 180°C, pois, a secagem modifica a massa do agregado, logo, este valor tem que ser corrigido. Além disso, no caso da borracha Pellet a incorporação foi feita antes da mistura. Contudo, na RAR, este processo de incorporação ocorreu no misturador.

A tabela 9 a seguir exemplifica os critérios volumétricos para a determinação do teor de projeto.

Tabela 9: Critérios volumétricos para teor de projeto

Esforço de compactação (número de giros)	Relação entre massa específica aparente e a <i>Gmm</i> (%)	Vv (%)
$N_{inicial}$	< 89%	> 11%
$N_{projeto}$	96%	4%
$N_{máximo}$	< 98%	> 2%

Segui a tabela 17 com os resultados da compactação por amassamento para o teor de projeto encontrado, CP 3A (8,3%).

Tabela 17: Resultados compactação CP 3A (8,8%) - RAR 30%

CP 3A	
% Ligante	0,088
Massa da amostra (g)	5000

Massa da amostra (g)	4816,5				
G_{mm} (g/cm ³)	2,439				
Nº de giros	Altura (mm)	$G_{mb, estimada}$ (g/cm ³)	$G_{mb, corrigida}$ (g/cm ³)	% Gmm	Va (%)
9	130,2	2,093	2,101	86,2	13,8
15	127,1	2,144	2,153	88,3	11,7
30	123,0	2,216	2,224	91,2	8,8
45	121,0	2,253	2,261	92,7	7,3
60	119,7	2,277	2,286	93,7	6,3
75	118,8	2,294	2,303	94,4	5,6
100	117,7	2,316	2,325	95,3	4,7
115	117,2	2,326	2,335	95,7	4,3
125	116,9	2,332	2,341	96,0	4,0
135	116,7	2,336	2,345	96,1	3,9
145	116,5	2,340	2,349	96,3	3,7
155	116,3	2,344	2,353	96,5	3,5
165	116,2	2,346	2,355	96,5	3,5
175	116,1	2,348	2,357	96,6	3,4
185	115,9	2,352	2,361	96,8	3,2
195	115,8	2,354	2,363	96,9	3,1
200	115,8	2,354	2,363	96,9	3,1
205	115,8	2,354	2,363	96,9	3,1
G_{mb} (medida)	-	2,363	-	-	-

Determinação de G_{mb} - AASHTO T 166	
Massa seca -A (g)	4816,5
Massa submersa - C (g)	2782,1
Massa saturada superfície seca - B (g)	4820,6
G_{mb} (g/cm ³)	2,363

Para $N_{projeto}$	G_{mb} (g/cm ³)	2,341
--------------------	-------------------------------	-------

Composição da Mistura	
% de agregado (P_s)	0,912
% da fração graúda (P_{CA})	0,628
% da fração miúda	0,344
Massa de Ligante (g)	440,0
Massa do agregado (g)	4560
Massa da fração graúda (g)	2863,68
Massa da fração miúda (g)	1568,64

Segui a tabela 18 com os resultados da compactação por amassamento para o teor de projeto encontrado, CP 3B (8,3%).

Tabela 18: Resultados compactação CP 3B (8,8%) - RAR 30%

CP 3B	
% Ligante	0,088
Massa da amostra (g)	5000

Massa da amostra (g)	4643,2				
G _{mm} (g/cm ³)	2,455				
Nº de giros	Altura (mm)	G _{mb, estimada} (g/cm ³)	G _{mb, corrigida} (g/cm ³)	% G _{mm}	Va (%)
9	125,5	2,094	2,092	85,2	14,8
15	122,2	2,150	2,149	87,5	12,5
30	118,0	2,227	2,225	90,6	9,4
45	115,9	2,267	2,265	92,3	7,7
60	113,9	2,307	2,305	93,9	6,1
75	113,6	2,313	2,311	94,1	5,9
100	112,4	2,338	2,336	95,1	4,9
115	111,9	2,348	2,346	95,6	4,4
125	111,7	2,352	2,351	95,7	4,3
135	111,4	2,359	2,357	96,0	4,0
145	111,2	2,363	2,361	96,2	3,8
155	111,0	2,367	2,365	96,3	3,7
165	110,8	2,371	2,370	96,5	3,5
175	110,6	2,376	2,374	96,7	3,3
185	110,4	2,380	2,378	96,9	3,1
195	110,3	2,382	2,380	97,0	3,0
200	110,2	2,384	2,383	97,0	3,0
205	110,1	2,386	2,385	97,1	2,9
G _{mb} (medida)	-	2,383	-	-	-

Determinação de G _{mb} - AASHTO T 166	
Massa seca - A (g)	4642,2
Massa submersa - C (g)	2698
Massa saturada superfície seca - B (g)	4646,4
G _{mb} (g/cm ³)	2,383

Para N _{projeto}	G _{mb} (g/cm ³)
	2,351

Composição da Mistura	
% de agregado (P _s)	0,912
% da fração graúda (P _{CA})	0,628
% da fração miúda	0,344
Massa de Ligante (g)	440,0
Massa do agregado (g)	4560
Massa da fração graúda (g)	2863,68
Massa da fração miúda (g)	1568,64

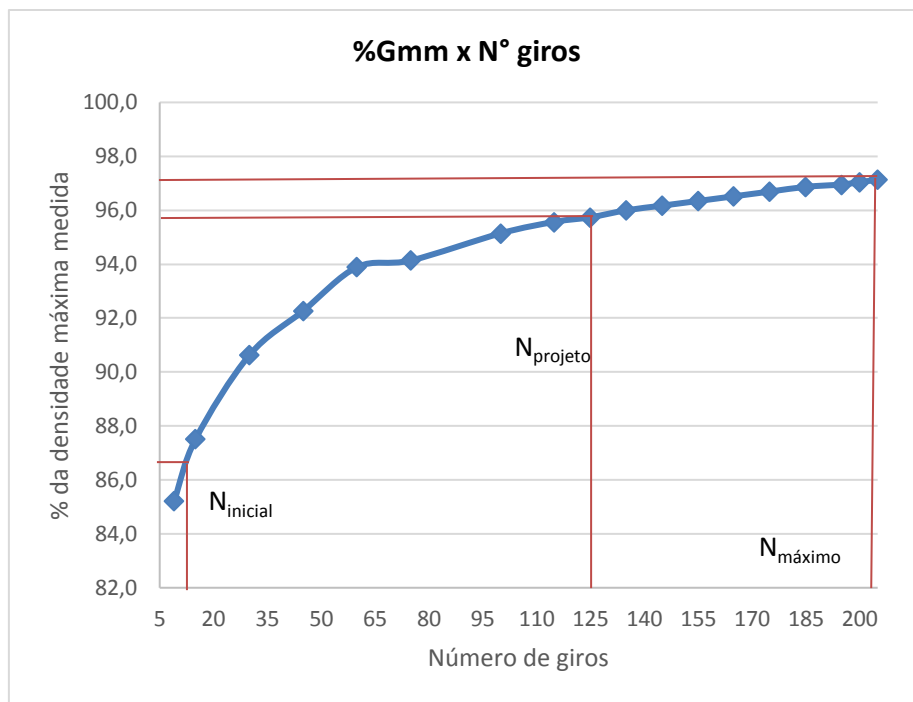


Figura 27: Gráfico % Gmm x N° de giros – RAR 30 %

As tabelas 19 e 20 ilustram os valores da Gmm e Gmb encontrados para 30% de RAR.

Tabela 19: Gmm – RAR 30%

Determinação da Densidade Máxima Teórica (Gmm) - ASTM D 2041				
Massa do recipiente (g)		2026,7	Tágua (oC)	
Massa do recipiente + água (g)		7023,1	25	
CP	Teor	Recipiente + Amostra (g)	Recipiente + Amostra + Água (g)	Gmm
1A	7,8%	3528,2	7916,1	2,468
1B	7,8%	3529,2	7916,5	2,467
2A	8,3%	3530,2	7919,3	2,476
2B	8,3%	3531,2	7922,6	2,487
3A	8,8%	3532,2	7916,1	2,458
3B	8,8%	3533,2	7908,8	2,427
4A	9,3%	3534,2	7906,7	2,416
4B	9,3%	3535,2	7919,2	2,463

Tabela 20: Gmb – RAR 30%

Massa específica aparente da mistura compactada - AASHTO T 166				
CP	Massa seca (g)	Massa submersa (g)	Massa saturada superfície seca (g)	Gmb
1A				2,330
1B	4576,7	2679,6	4584,6	2,384
2A	4853,5	2827,2	4859,6	2,387
2B	4763,1	2776,0	4769,4	2,366
3A	4875,5	2838,1	4880,7	2,363
3B	4851,7	2817,6	4857,6	2,383
4A	4747,8	2771,8	4751,2	2,374
4B	4806,9	2796,8	4810,6	2,372

5. CONCLUSÃO

Tendo em vista o atual cenário de patologias nas rodovias brasileiras, esta pesquisa tem relevante importância, pois, apresentam resultados da dosagem Superpave para o modificante Pré-ativado com grânulos de borracha. Como dito anteriormente o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) modificado é um material visco-elastoplástico, onde a intenção do agente modificante é aumentar a parcela elástica, pois, a maioria das patologias advêm de deformações plásticas. Apesar das vantagens obtidas com a incorporação de borracha a misturas asfálticas, sua produção requer instalação de equipamentos específicos na usina, além de elevada temperatura e tempo de mistura fazendo com que a obtenção de misturas com asfalto-borracha tenha custo mais elevado em comparação com as misturas convencionais. Assim esta borracha RAR é uma ótima alternativa, pois, sua incorporação ocorre direto no misturador de forma simples, dispensando equipamentos específicos e elevadas temperaturas.

Apesar de uma granulometria bem graduada proporcionar uma mistura densa e compacta, para a realização deste trabalho optou-se por utilizar uma granulometria aberta (Gap-Graded), pois, proporciona espaço suficiente para a atuação do modificador.

Como esperado, tal granulometria adotada requer maior teor de ligante para preencher os vazios. Os resultados comprovam que para a dosagem Superpave o teor de projeto para a mistura com 30% de Pellets, 25% de RAR e 30% de RAR são 8,8%, 8,3% e 8,8% respectivamente.

Em uma pesquisa sobre dimensionamento de pavimentos com camada desgastada em misturas asfálticas com borracha, realizado na 15ª reunião de pavimentação urbana, foi-se adotado também a curva granulométrica da ADOT. Nesta pesquisa o teor encontrado pela metodologia Marshall foi de 8,5%. Valor próximo aos encontrados nesta pesquisa.

A demanda de ligante para a granulometria Gap-Graded é maior que para uma mistura com granulometria densa, isso acarreta um maior custo inicial, porém, o ganho se dá a longo prazo, pois, conforme descrito anteriormente, a RAR como um extensor elastômero do asfalto permite, quando adicionada a um asfalto convencional, obter propriedades superiores comparativamente a um asfalto modificado com polímeros e até mesmo outros asfalto-borracha (Sousa al. (2012).

4.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM (2009). ASTM D6114 – Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder. American Society for Testing Materials, United States of América.
- Wu, C., Sousa, J. B., Li A. & Zhao, Z. (2012). Activated Minerals as Binder Stabilizers in Middle Course's Asphalt Concrete Paving Mixtures. 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, January.
- Ceratti, J. A. P., Reis R. M. M. (2011). Manual de dosagem de concreto asfáltico. Rio de Janeiro: Instituto Pavimentar.
- CNT (2015). Pesquisa Rodoviária 2015 – Relatório Gerencial. Confederação Nacional de Transportes, Brasília, DF. CNT: SEST: SENAT, 2015.
- Dantas Neto, S. A. (2004). Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas Asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Leite, L. M. F., Constatino, R.S. & Vivoni, A. (2000). Rheological studies of asphalt with ground tire rubber. Asphalt Rubber 2000 - Proceedings, Vilamoura, Portugal, p.421-434.
- Morilha, Jr. A. e Greca, M. R. (2003). Betume Borracha Ecoflex. Greca Asfaltos. Curitiba, Paraná, Brasil.
- Pinheiro, J. H. M. (2004). Incorporação de Borracha de Pneu em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco). Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 166 fl.
- Sides, A., Uzan, J. & Perl, M. (1985). A comprehensive visco-elastoplastic characterization of sand-asphalt under compression and tension cyclic loading. Journal of Testing and Evaluation. (13): 49-59.
- Specht, L. P. (2004) Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- Sousa, J. B., Vorobiev, A., Ishai, I., Svehinsky, G. (2012). Elastomeric Asphalt Extender – A New Frontier on Asphalt Rubber Mixes. Asphalt Rubber 2012 – Proceedings, Munich, Germany, 2012, p. 161-181.
- Way, G.B. (2003). OFGC Meets CRM: where the rubber meets the rubber: 15 Years of Durable Success. Asphalt Rubber 2003 - Proceedings, Brasilia, Brazil, p. 49-63.
- Bernucci, L. B. (2009). Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: Pétrobrás; ABED.
- SINESP, (2014). www.sinesp.com.br/ acessado 28/06/2016 às 14hs.
- Senço, W. (2007). Manual de Técnicas de Pavimentação. São Paulo. PINI.
- Caltrans, (2003). Asphalt Rubber Usage Guide
- Takallou, H. B. & Takallou M. B. (2003). Effects of mixing time and temperature on the visco-elastic properties of asphalt rubber binder. Asphalt Rubber 2003 – Proceedings, Brasilia, Brazil, 2003, p. 589-602.
- Fundação Dom Cabral. www.fdc.org.br/ acessado 30/06/2016 às 23 horas.
- Norma DNER-ME 054/97

Norma DNER-ME 081/98

Norma DNER-ME 035/98

Norma DNER-ME 054/97

ANIP (2016). Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. www.anip.com.br acessado 30/06/2016 às 21:00 horas.

Neto, S. (2004). Avaliação das propriedades dos ligantes e das misturas asfálticas modificadas com borracha granulada de pneus usados.

www.pellet.com/ acessado 06/12/2016 às 20 horas